1 La electricidad Conceptos generales

La energía eléctrica

La electricidad es una forma de la energía que, en la actualidad, más ventajas aporta a los seres humanos. Con ella conseguimos fundamentalmente las siguientes aplicaciones: luz con las lámparas eléctricas; calor con cocinas, hornos y calefacciones; frío con frigoríficos y equipos de aire acondicionado; fuerza motriz con motores (ascensores, máquinas herramientas, vehículos eléctricos, electrodomésticos, etc); sistemas de información, automatización y telecomunicación con ordenadores, microprocesadores, sistemas robotizados, televisores, radio, etc; y muchas más aplicaciones que con el paso de los años van creciendo más y más.

La electricidad se produce fundamentalmente en las centrales eléctricas. Su misión consiste en transformar cualquier forma de energía primaria (hidráulica, térmica, nuclear, solar, etc.) en energía eléctrica. Dada la facilidad con que se transporta la electricidad, por medio de las líneas eléctricas, la ventaja fundamental que conseguimos con esto es que producimos energía eléctrica en las zonas donde podemos acceder con facilidad a la energía primaria, para luego consumirla en ciudades, empresas y cualquier otro centro de consumo (Figura 1.1).

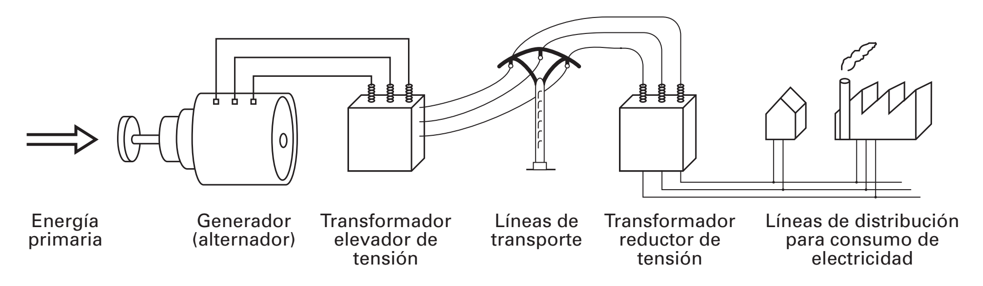


Figura 1.1

Efectos de la electricidad

Pero ¿qué es exactamente la electricidad? Podríamos decir que es lo que hace girar los motores, lucir las lámparas, en definitiva una fuerza, que como tal es invisible y de la cual sólo se notan su efectos.

Los efectos fundamentales que se conocen de la corriente eléctrica son:

- **Efecto térmico:** Al fluir la corriente eléctrica por ciertos materiales conductores, llamados resistivos, como el carbón, se produce calor en los mismos pudiendo construir, gracias a este efecto, calefacciones, cocinas, hornos, calentadores de agua, planchas, secadores, etc. (Figura 1.2).

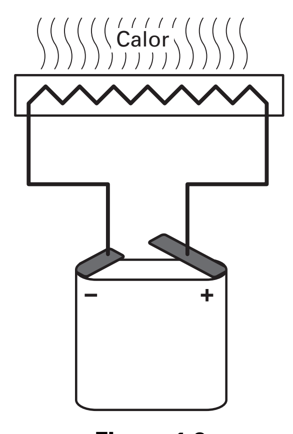


Figura 1.2

- **Efecto luminoso:** En una lámpara eléctrica incandescente, al fluir por su filamento resistivo una corriente eléctrica, éste se calienta a altas temperaturas irradiando luz (Figura 1.3).

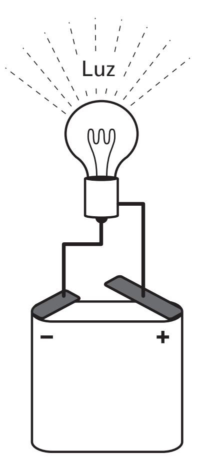


Figura 1.3

- **Efecto químico:** Al fluir la corriente eléctrica por ciertos líquidos, éstos se disgregan, dando el nombre de electrólisis a dicho proceso. Gracias a este efecto se pueden producir productos químicos y metales, baños metálicos (galvanización) y recarga de baterías de acumuladores (Figura 1.4).

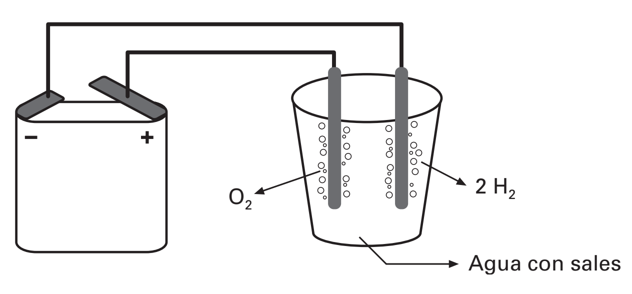


Figura 1.4

- **Efecto magnético:** Al conectar una bobina a un circuito eléctrico, ésta produce un campo magnético similar al de un imán, lo que origina un efecto de atracción sobre ciertos metales. Aprovechando este efecto se pueden construir electroimanes, motores eléctricos, altavoces, instrumentos de medida, etc. (Figura 1.5).

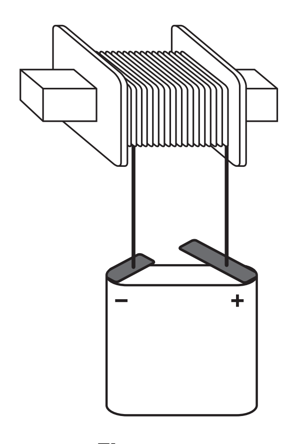


Figura 1.5

> ***Experiencia 1.1***
>
> Consigue una pila y una lámpara de linterna y conéctalas con unos conductores de cobre tal como se indica en la Figura 1.6.

Podrás comprobar como la lámpara se enciende cuando se ponen en contacto los terminales de la lámpara con los bornes de la pila y se apaga cuando interrumpimos la conexión de uno de los conductores con la pila (Figura 1.7).

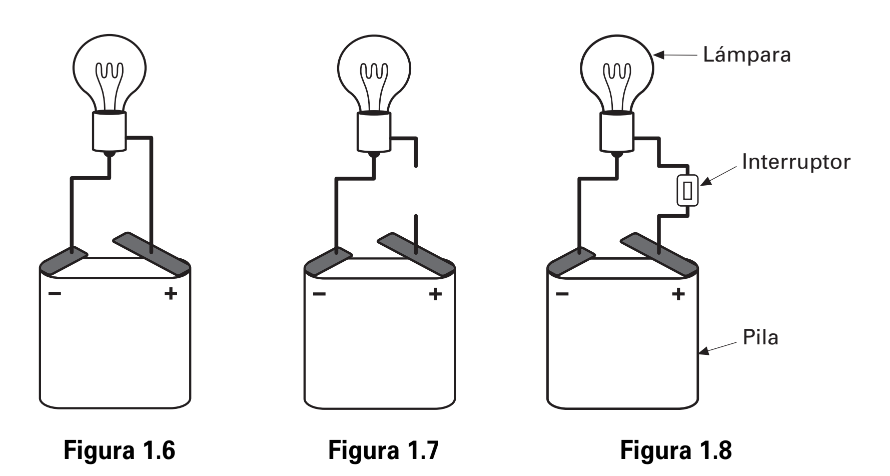


Figura 1.6 **Figura 1.7** **Figura 1.8**

La pila contiene energía eléctrica. Al conectarla mediante unos conductores a la lámpara, por éstos fluye una corriente eléctrica hacia la misma que hace que ésta transforme la energía eléctrica en luminosa.

☞ *Ahora conecta un interruptor tal como se muestra en la Figura 1.8 y a continuación abre y ciérralo.*

Podrás comprobar que la lámpara sólo se enciende cuando el interruptor pone en contacto el borne de la pila con el terminal de dicha lámpara. De esta manera podemos encender y apagar la lámpara a nuestra voluntad.

Existe otra forma más fácil de hacer un dibujo eléctrico, tal como se muestra en la Figura 1.9. Se le denomina esquema eléctrico y en él se representan a sus elementos (pila, conductores y lámpara) mediante símbolos normalizados.

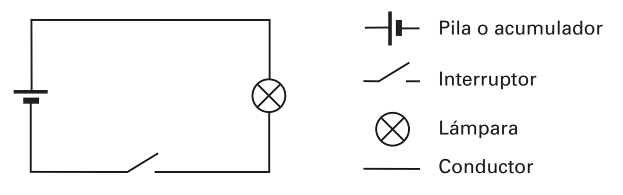


Figura 1.9

La electricidad

La electricidad es una manifestación física que tiene que ver con las modificaciones que se dan en las partes más pequeñas de la materia, nos referimos a los átomos y más concretamente al electrón. Seguidamente estudiaremos los fenómenos de electrización que se dan en los materiales.

Experiencia 1.2

Consigue un bolígrafo de plástico y frótalo con un paño de lana. Seguidamente, acércalo a unos pedacitos de papel Figura 1.10.

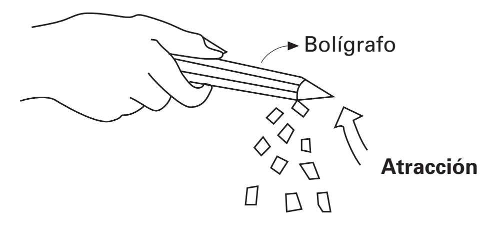


Figura 1.10

Después de frotar el bolígrafo los trozos de papel son atraídos por éste, lo que indica que gracias al frotamiento se han desarrollado unas fuerzas debido a las cargas eléctricas, que previamente no existían.

Para explicar el fenómeno de electrización observado en la experiencia 1.2 es necesario comprender los cambios que se han podido producir en las partes más pequeñas de la materia.

Los materiales están compuestos básicamente por moléculas, siendo éstas las partículas más pequeñas que poseen todas las propiedades físicas y químicas del material original. A su vez, estas moléculas se componen de otras partículas más pequeñas, llamadas átomos. Así, por ejemplo la molécula de agua se compone de dos átomos de hidrógeno y de uno de oxígeno, tal como indica su fórmula química H_2O.

El átomo es muy pequeño, del orden de una diez millonésima de milímetro. Está compuesto de partes todavía más pequeñas como son el núcleo y los electrones. El núcleo del átomo está formado por partículas elementales, tales como los protones y neutrones (Figura 1.11).

Los electrones giran a gran velocidad en órbitas alrededor del núcleo.

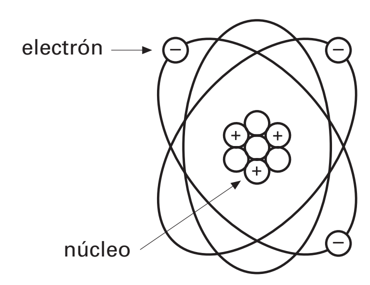


Figura 1.11

Si fuera posible situar un electrón frente a un protón, se podría observar un fenómeno de atracción. Al contrario, si enfrentamos dos electrones o dos protones éstos se repelen (Figura 1.12). Esto nos indica que tanto el electrón como el protón poseen una propiedad que se manifiesta en forma de fuerzas de atracción y de repulsión, nos estamos refiriendo a la **carga eléctrica**. Esta carga eléctrica es de diferente signo para el electrón y para el protón:

•*El protón tiene carga eléctrica positiva.*

•*El electrón tiene carga eléctrica negativa.*

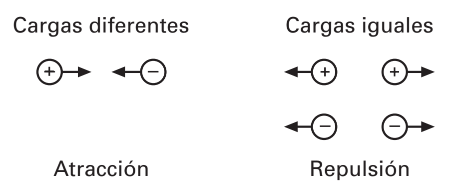


Figura 1.12

En un átomo, los protones se concentran en el núcleo junto a los neutrones y algunas partículas atómicas. A pesar de que los protones posean carga positiva y que entre ellos exista una gran fuerza repulsiva, éstos se mantienen confinados y muy próximos entre sí en el núcleo debido a las enormes fuerzas de carácter nuclear. Los neutrones no poseen carga eléctrica y aportan masa al núcleo del átomo.

Los fenómenos que se dan en un átomo son comparables a los que se dan en el sistema solar. El planeta es el electrón y el sol es el núcleo. En un átomo los electrones giran a gran velocidad dentro de sus respectivas órbitas alrededor del núcleo. La fuerza centrífuga que éstos desarrollan en su giro se ve compensada por la fuerza de atracción que aparece entre los protones de carga positiva situados en el núcleo y dichos electrones.

El electrón posee una masa muy pequeña, entorno a algo más de la milésima parte de la masa de un protón. Además, los electrones más alejados del núcleo son atraídos con menor fuerza por el mismo, lo que hace posible su movilidad hacia otros átomos.

- **Átomo con carga neutra:** Un átomo en estado normal posee el mismo número de electrones que de protones. Esto hace que exista un equilibrio entre las fuerzas de carácter eléctrico que se dan entre protones y neutrones, y por tanto dicho átomo permanezca eléctricamente neutro. Así, por ejemplo, un átomo de litio posee 3 protones y 3 electrones: 3(+) + 3(-) = 0 (Figura 1.13).

- **Átomo con carga positiva:** Si por algún medio consiguiésemos arrancar electrones de las últimas órbitas de los átomos, surgiría un desequilibrio entre el número de cargas negativas y positivas, siendo mayores estas últimas y

confiriendo, por tanto, un carga positiva a dicho átomo. Así, por ejemplo, al frotar con un paño el litio, es posible que se arranque un electrón de su última órbita, quedando el átomo cargado positivamente por poseer un defecto de electrones: 3(+) + 2(-) = 1(+) (Figura 1.14).

- **Átomo con carga negativa:** De la misma manera, si por algún procedimiento conseguimos agregar electrones a un átomo eléctricamente neutro, este exceso de electrones produce una carga negativa en el átomo. En el ejemplo del litio, al añadir un electrón en su última órbita da como resultado una carga negativa: 3(+) + 4(-) = 1(-) (Figura 1.15).

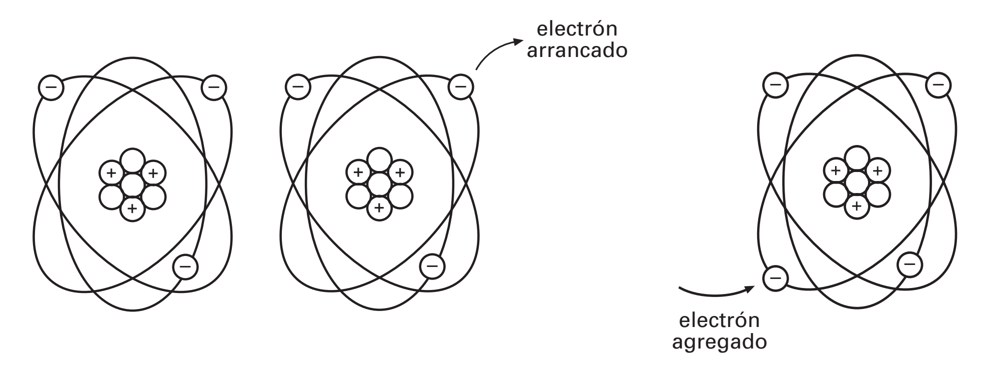


Figura 1.13 Figura 1.14 Figura 1.15

Electricidad estática

Al frotar determinados materiales aislantes, éstos pierden o ganan electrones, lo que origina cargas eléctricas estáticas en dichos materiales. Este tipo de electricidad es el que se da, por ejemplo, en la experiencia 1.2 realizada anteriormente.

Al frotar el bolígrafo de plástico con el paño, se transfieren electrones de un elemento a otro, quedando el bolígrafo cargado eléctricamente. Cuando acercamos el bolígrafo, cargado con electricidad estática a los papelitos, los atrae como es propio de los cuerpos electrizados.

El tipo de carga (positiva o negativa) con la que se electrizan los materiales después de haber sido frotados depende de los materiales que se empleen en el proceso. Así, por ejemplo, si se frota una barra de vidrio con un paño de lana, los electrones se transfieren del vidrio hacia el paño, quedando electrizado el primero con carga positiva (Figura 1.16). Por otro lado, si lo que frotamos es una barra de ebonita con una piel de animal, los electrones son transferidos de la piel a la ebonita, quedando esta última cargada negativamente (Figura 1.17).

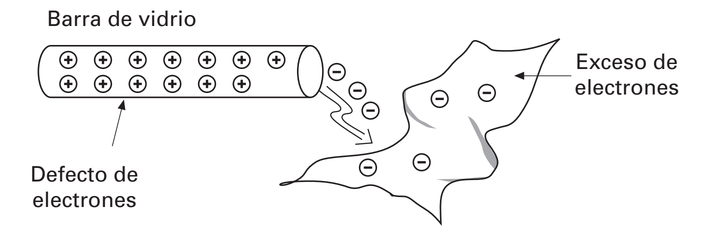


Figura 1.16

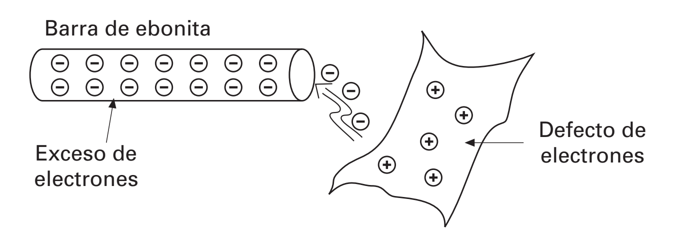


Figura 1.17

☞ *¿Qué ocurre si después de frotar dos barras de vidrio se acercan? (Figura 1.18).*

☞ *¿Qué ocurre si después de frotar una barra de vidrio y una de ebonita se acercan? (Figura 1.19).*

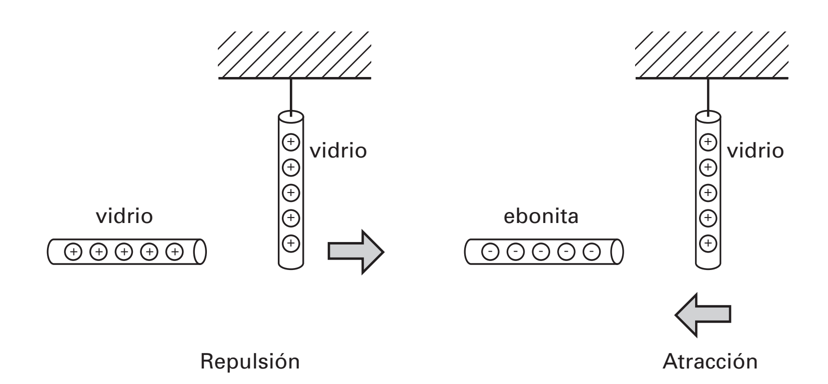


Figura 1.18 **Figura 1.19**

El causante en todo momento de la electrización de los cuerpos es el electrón, ya que posee carga y movilidad para poder desplazarse por los materiales. A partir de estos dos conceptos es posible que exista la electricidad.

Carga eléctrica

Se conoce como carga eléctrica de un cuerpo al exceso o defecto de electrones que éste posee:

Carga negativa significa exceso de electrones
Carga positiva significa defecto de electrones

La unidad de carga eléctrica es el **culombio**.

1 Culombio equivale aproximadamente a un exceso o defecto de 6 trillones de electrones (1 culombio = $6{,}3 \cdot 10^{18}$ electrones).

Ejemplos

1.1. Determinar la carga eléctrica que tiene un barra de ebonita si una vez frotada posee un exceso de $25{,}2 \cdot 10^{18}$ electrones:

$$Q = \frac{25{,}2 \cdot 10^{18}}{6{,}3 \cdot 10^{18}} = 4 \text{ culombios de carga negativa}$$

Movimiento de electrones

Supongamos que cargamos eléctricamente, por frotamiento, una bola de vidrio y otra de ebonita y las disponemos tal como se indica en la Figura 1.20. Entre ellas aparece una diferencia de carga eléctrica. Si ahora unimos eléctricamente las dos bolas mediante un conductor eléctrico (Figura 1.21), los electrones en exceso de la bola de ebonita cargada negativamente, serán atraídos con fuerza por la carga positiva de la bola de vidrio. Dado que existe un camino conductor por donde se pueden desplazar los electrones de una bola a otra, aparece un **movimiento de electrones** por el mismo hasta que las cargas queden compensadas, es decir, hasta que la **diferencia de cargas** deje de existir.

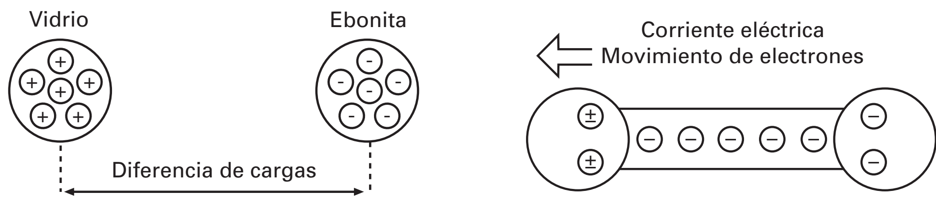


Figura 1.20 **Figura 1.21**

Al movimiento de electrones que se establece por el conductor eléctrico se le denomina **corriente eléctrica**. Como se puede observar en la Figura 1.21 el sentido de la corriente eléctrica lo establecen los electrones, es decir, del cuerpo donde hay exceso de electrones hasta el cuerpo donde hay defecto de ellos (del negativo al positivo).

A la diferencia de cargas que establece entre los dos cuerpos cargados eléctricamente, y que es la causante del movimiento de electrones, se la conoce por otro nombre: **tensión o diferencia de potencial**.

El circuito eléctrico

En la experiencia 1.1 construimos un sencillo circuito eléctrico, vamos a estudiar ahora las magnitudes básicas y los fenómenos que se dan en él.

Las condiciones que se han de dar para que se forme un circuito eléctrico básico como el de la Figura 1.22 son:

- Un *GENERADOR* que se encarga de generar una diferencia de cargas o tensión entre sus dos polos. En la experiencia 1.1 utilizamos como tal una pila de 4,5 voltios de tensión.
- Un *CONDUCTOR* que permita que fluyan los electrones de una parte a otra del circuito. En la experiencia empleamos conductores de cobre.
- Un *RECEPTOR* o aparato eléctrico que aprovechando el movimiento de electrones consigue transformar la energía eléctrica en energía calorífica, luminosa, motriz, etc. En la experiencia usamos una lámpara de linterna.

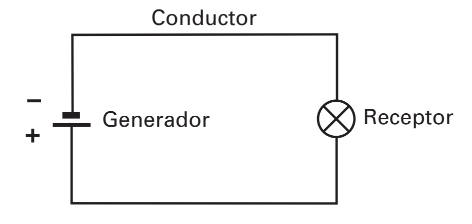


Figura 1.22

Estudiaremos ahora detenidamente cómo fluye la corriente eléctrica por el circuito (véase Figura 1.23). El generador (en este caso una pila) a costa de consumir algún tipo de energía separa las cargas en el interior del generador gracias a la fuerza electromotriz (f.e.m.), tomando electrones de una placa y depositándolos en otra. La placa donde son arrancados los electrones queda, por tanto, cargada positivamente

(defecto de electrones), mientras que la placa donde se depositan se carga negativamente (exceso de electrones), formándose el polo positivo y negativo del generador. Ahora, entre dichos polos aparece una diferencia de cargas o tensión eléctrica que hace que los electrones sean fuertemente atraídos por el polo positivo. A través del generador los electrones no pueden fluir de un polo a otro dado que la fuerza electromotriz es de un valor un poco más alto que la fuerza provocada por la tensión. El único camino posible por donde los electrones pueden moverse desde el polo negativo es por el conductor y atravesando el receptor hasta llegar al polo positivo. La f.e.m. del generador se encarga de seguir separando las cargas continuamente y la tensión en bornes de la pila de reponerlos a través del receptor en un movimiento continuo, completándose así lo que se conoce por circuito eléctrico.

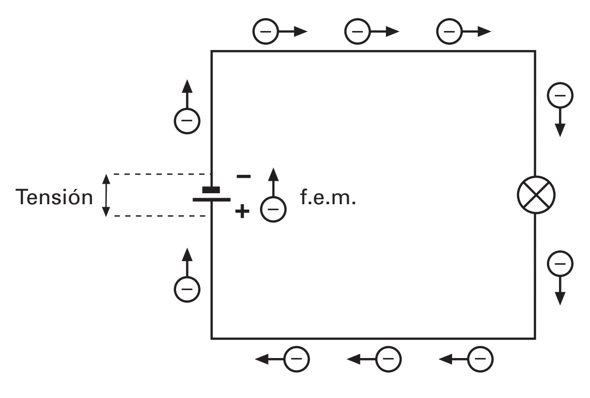


Figura 1.23

Una vez que ya sabemos lo que es un circuito eléctrico, vamos a pasar a estudiar detenidamente, a lo largo de este "curso de electricidad general," las partes que forman dicho circuito. Comenzaremos con las formas de producir electricidad, es decir los diferentes tipos de generadores, para seguir con el estudio de las magnitudes más fundamentales de un circuito y sus relaciones, así como el de los conductores y aislantes, elementos que producen calor, propiedades químicas y magnéticas de la electricidad, pilas, acumuladores, lámparas y motores.

Formas de producir electricidad

El encargado de producir la electricidad es el generador, que aprovechando algún fenómeno físico es capaz de desarrollar una determinada fuerza electromotriz que separa las cargas entre sus polos y crea una diferencia de potencial o tensión. Existen varias formas de producir electricidad, de las cuáles se construyen los diferentes tipos de generadores:

Producción de electricidad por reacción química: Las pilas y acumuladores son generadores que, aprovechando la energía que se desarrolla en determinadas reacciones químicas producen electricidad.

Así, por ejemplo, podemos fabricar una pila sencilla con los elementos de la Figura 1.24. Aquí introducimos una barra de cobre (Cu) y una barra de cinc (Zn) en una disolución de agua (H_2O) con unas gotas de ácido sulfúrico (H_2SO_4). Los terminales de ambas barras se conectan a un voltímetro.

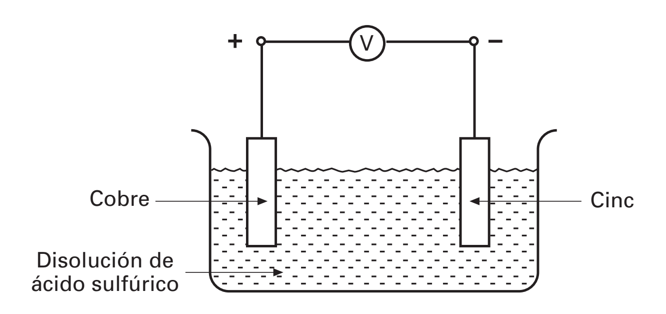


Figura 1.24

El ácido sulfúrico disuelve las barra de cinc y de cobre, pasando sus átomos a la disolución. Por un lado, el cinc cede átomos a la disolución, dejando acumulados gran cantidad de sus electrones en la barra de cinc. Con la barra de cobre pasa algo similar, pero en ella se acumulan muchos menos electrones. El resultado es que la barra de cinc se hace mucho más negativa que la barra de cobre, apareciendo una diferencia de cargas, o tensión eléctrica entre las dos barras.

Mientras exista material activo en las barras para disolverse, esta pila elemental producirá fuerza electromotriz, teniendo que desecharla al agotarse dichos materiales.

Al contrario, los acumuladores eléctricos, como los que constituyen las baterías de los automóviles, se pueden recargar una vez agotados. Para ello basta con hacerle pasar una corriente eléctrica cuando está descargado. Esto se consigue conectándolo a una fuente de energía eléctrica.

Las aplicaciones prácticas de las pilas y acumuladores son ya bastante conocidas por todos nosotros, destacamos algunas de ellas: alimentación de aparatos portátiles, vehículos eléctricos, automóviles, instalaciones fotovoltaicas de energía solar, almacenamiento de energía eléctrica de emergencia, etc.

Producción de electricidad por presión. Existen ciertos materiales, como los cristales de cuarzo, que cuando son golpeados o presionados, entre sus caras aparece una tensión eléctrica (Figura 1.25). De alguna manera lo que ocurre es que al presionar

el cristal los electrones salen desplazados de una de las caras a la otra, originando una diferencia de cargas. Esta propiedad se le denomina “piezoelectricidad”.

Dado que la diferencia de potencial que aparece entre las caras de estos materiales es proporcional a la presión ejercida, es posible la construcción con ellos de agujas para tocadiscos, micrófonos piezoeléctricos, etc.

Ciertos encendedores de cocina aprovechan el efecto piezoeléctrico para su funcionamiento. En estos casos, un percutor golpea con fuerza un cristal, lo que provoca una fuerte diferencia de potencial entre sus caras (del orden de algunos miles de voltios). Al aplicar esta fuerte tensión entre dos electrodos, surge una chispa eléctrica entre ellos.

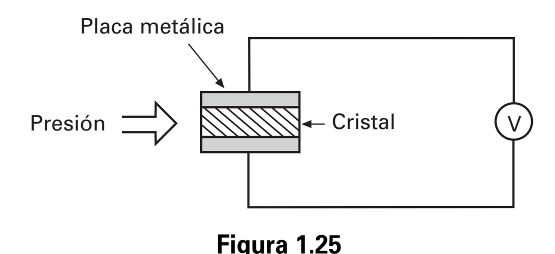


Figura 1.25

Producción de electricidad por acción de la luz. Mediante la células fotovoltaicas es posible transformar directamente la energía luminosa en energía eléctrica.

La célula fotovoltaica se construye con materiales semiconductores sensibles a la luz. Al incidir la energía luminosa en estos semiconductores, se provoca el desprendimiento de electrones en las últimas órbitas de sus átomos, provocando una diferencia de cargas entre su caras (Figura 1.26).

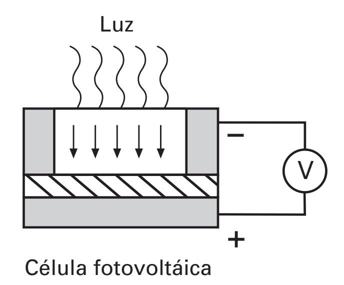


Figura 1.26

Las aplicaciones de esta forma de producir electricidad son: generadores de energía eléctrica para satélites espaciales y para suministro autónomo de energía en instalaciones apartadas de la red eléctrica.

Producción de electricidad por acción del calor. Algunos cuerpos poseen propiedades termoeléctricas, con los cuales se pueden construir pares termoeléctricos. Éstos constan de dos metales distintos y unidos, que al ser calentados, manifiestan una diferencia de potencial entre sus extremos. Este fenómeno es debido a que, uno de los metales desprende más electrones que el otro por efecto del calor, generándose una pequeña diferencia de cargas entre sus extremos que es proporcional a la temperatura de la unión.

La energía eléctrica que se produce mediante este sistema es muy pequeña. Mediante este fenómeno se fabrican termopares para la construcción de termómetros (especialmente para medir temperaturas en hornos). (Figura 1.27).

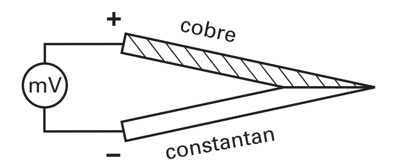


Figura 1.27

Producción de electricidad por acción magnética."Cuando se mueve un conductor eléctrico (hilo metálico) en el seno de un campo magnético (imán o electroimán) aparece una corriente eléctrica por dicho conductor. Lo mismo ocurre si se mueve el imán y se deja fijo el conductor"(Figura 1.28).

En un generador eléctrico se hacen mover bobinas en sentido giratorio en las proximidades de campos magnéticos producidos por imanes o electroimanes (Figura 1.29). Se basa en el principio de Faraday, y de esta forma se produce la energía en las grandes centrales eléctricas mediante los alternadores en forma de corriente alterna, o en otros casos con las dinamos en forma de corriente continua.

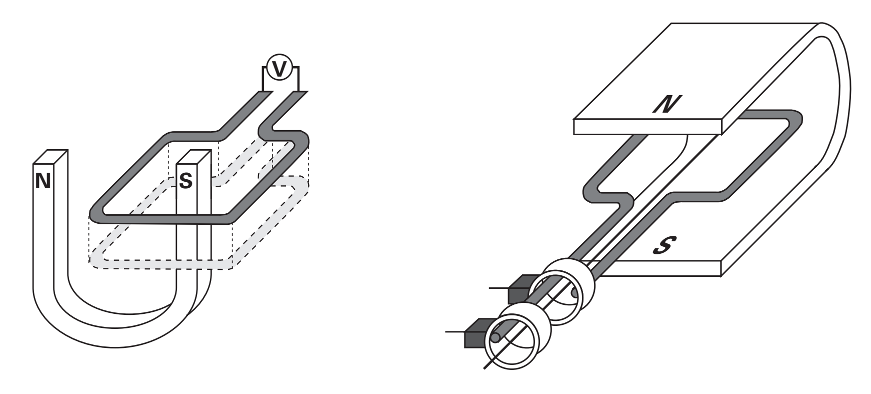


Figura 1.28 **Figura 1.29**

Intensidad de la corriente eléctrica

La intensidad de la corriente eléctrica es la cantidad de electricidad que recorre un circuito en la unidad de tiempo (Figura 1.31). Esta magnitud es comparable al caudal de agua que fluye por una tubería de agua (Figura 1.30).

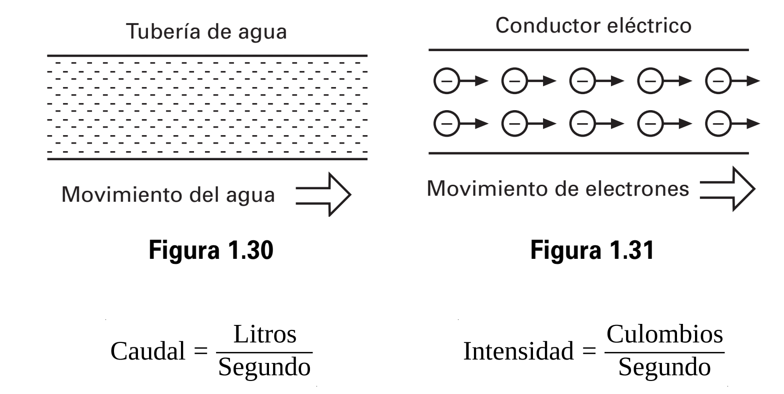


Figura 1.30 **Figura 1.31**

$$\text{Caudal} = \frac{\text{Litros}}{\text{Segundo}} \qquad \text{Intensidad} = \frac{\text{Culombios}}{\text{Segundo}}$$

La unidad de medida de la intensidad (símbolo *I*) de corriente eléctrica es el ***amperio (A).*** De esta manera, cuando en un circuito se mueve una carga de un culombio en un tiempo de un segundo, se dice que la corriente tiene una intensidad de un amperio.

$$I = \frac{Q}{t} \qquad 1 \text{ Amperio} = \frac{1 \text{ Culombio}}{1 \text{ Segundo}}$$

Ejemplos

1.2 Determinar la intensidad de corriente que se ha establecido por un conductor eléctrico si por él a fluido una carga de 4 culombios en un tiempo de 2 segundos.

Solución:

$$I = \frac{Q}{t} = \frac{4 \text{ C}}{2 \text{ s}} = 2 \text{ A}$$

Sentido real y convencional de la corriente

En un circuito el sentido de la corriente eléctrica lo determina el movimiento de electrones, tal como se indica en la Figura 1.32. Sin embargo los antiguos científicos creían que la corriente eléctrica fluía del cuerpo cargado positivamente al cargado

negativamente. Este sentido, denominado ***convencional*** es el que más se ha utilizado hasta ahora, dado que en él se fundamentan muchas reglas del electromagnetismo y de otras materias afines. Incluso, hoy en día se sigue utilizando en multitud de casos (Figura 1.33).

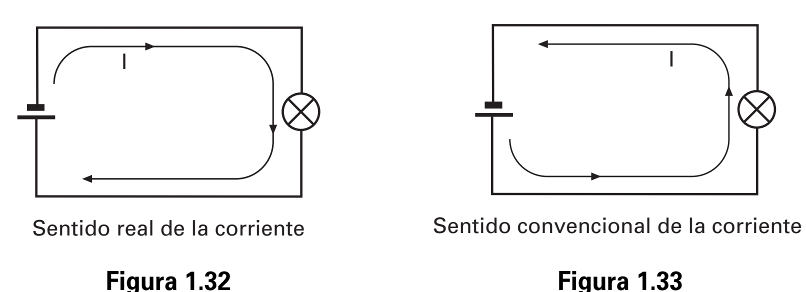


Figura 1.32 **Figura 1.33**

Movimiento de electrones en un circuito

En un circuito eléctrico, como el de la Figura 1.32, la intensidad de la corriente en cualquier punto del mismo es igual. Es decir, existe el mismo flujo de electrones a la salida del generador que a su entrada. Hay que pensar que, al igual que en una tubería que está llena de agua a presión, un conductor eléctrico está también lleno de electrones libres dispuestos a moverse. En el momento que algunos se muevan, empujan al resto, estableciéndose un efecto de traslación uniforme de electrones en todo el conductor. Este efecto de traslación se comunica a la velocidad de 300.000 Km/s.

Sin embargo, los electrones se mueven lentamente, dependiendo su velocidad de la intensidad de la corriente y de la sección del conductor. Por lo general, esta velocidad está entorno a algunos milímetros por segundo. Aunque, al conectar, por ejemplo, una lámpara a una fuente de energía eléctrica, se enciende prácticamente al instante, ya que todos los electrones libres del conductor entran en movimiento a la vez.

Medida de la corriente eléctrica

Para medir la intensidad de la corriente eléctrica utilizamos un aparato de medida llamado amperímetro. Para medir el caudal de agua intercalamos en la tubería un contador. De la misma manera, para medir la cantidad de cargas que se mueven por un circuito por unidad de tiempo, el amperímetro deberá estar intercalado en el conductor (Figura 1.34). Dado que la intensidad de la corriente es igual en todos los puntos del circuito, es indiferente donde conectemos el amperímetro.

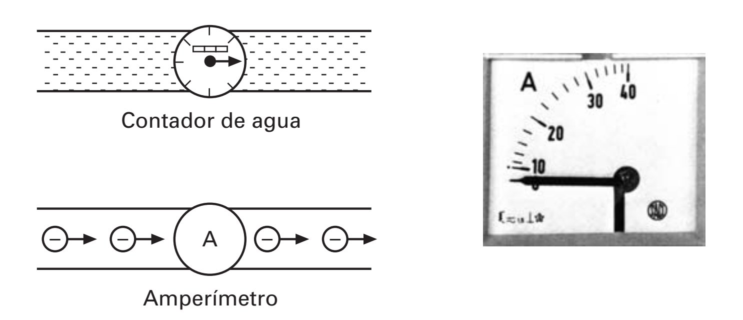


Figura 1.34

A esta forma de conectar el amperímetro se le denomina “en serie”.

Experiencia 1.3

Toma un amperímetro (o en su defecto un polímetro) y mide la intensidad que fluye por una lámpara al ser conectada a una pila (Figura 1.35). Al hacer el montaje cuida que el aparato de medida sirva para medir corriente continua, que las polaridades sean las correctas y que la escala elegida sea la adecuada con la magnitud a medir, ya que de otra manera podríamos estropear el instrumento medidor.

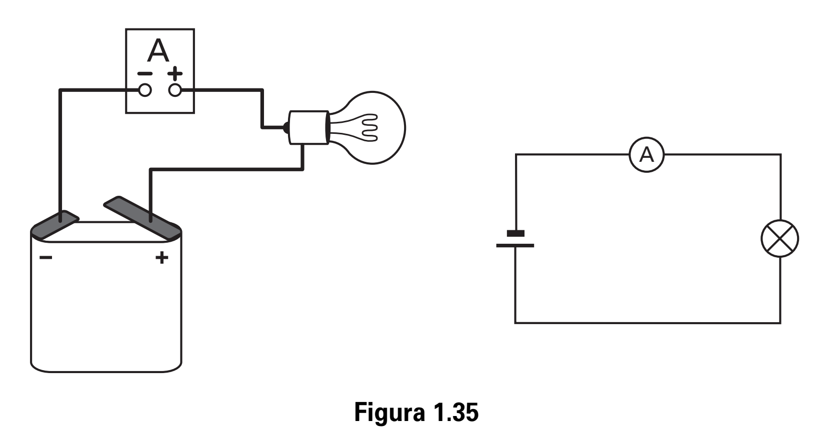


Figura 1.35

Gracias a la experiencia 1.3, habrás podido observar que el amperio no es una unidad de medida adecuada, ya que resulta excesivamente grande para expresar el resultado. En estos casos se utilizan los submultiplos:

1 mA (miliamperio) = 1/1000 = 0,001= 10^{-3} A

1 μA (microamperio) = 1/1000000 = 0,000001 =10^{-6} A

Corriente continua (C.C.)

Corriente continua es la que proporcionan las baterías de acumuladores, pilas, dinamos y células fotovoltaicas. Su símbolo de representación es —.

Una corriente continua se caracteriza porque los electrones libres siempre se mueven en el mismo sentido por el conductor y con una intensidad constante.

En el circuito de la Figura 1.36 la pila proporciona C.C. a la lámpara. El amperímetro indicará siempre la misma corriente, por ejemplo 1 A. La aguja del aparato de medida se desviará siempre hacia la derecha de la escala. Si invirtiésemos la polaridad de la pila, la aguja indicadora intentaría desviarse hacia la izquierda.

En el gráfico de la Figura 1.37 se ha representado la C.C. de 1 A. Observa como este valor se mantiene invariable con el paso del tiempo.

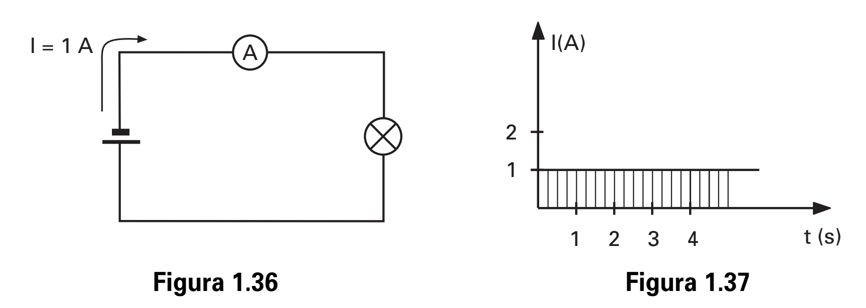


Figura 1.36 **Figura 1.37**

Los usos que se hacen de la C.C. son muy variados: baños electrolíticos, alimentación de aparatos electrónicos, tracción eléctrica (coches, tranvías, etc…) y otras muchas.

Corriente alterna (C.A.)

La corriente alterna es la que producen los alternadores en las centrales eléctricas. Es la forma más común de transportar la energía eléctrica y de consumirla en nuestros hogares e industria en general. Su símbolo es ~.

Una corriente alterna se caracteriza porque el flujo de electrones se mueve por el conductor en un sentido y en otro, y además el valor de la corriente eléctrica es variable. Se podría decir, que en este caso el generador produce periódicamente cambios en la polaridad de sus terminales de salida (Figura 1.38). Para entender esto mejor, observa el gráfico de la Figura 1.39. El eje de tiempos lo hemos puesto en milisegundos, ya que los cambios de corriente son muy rápidos (para una C.A. industrial la señal representada en la Figura 1.39 se repite 50 veces en un segundo).

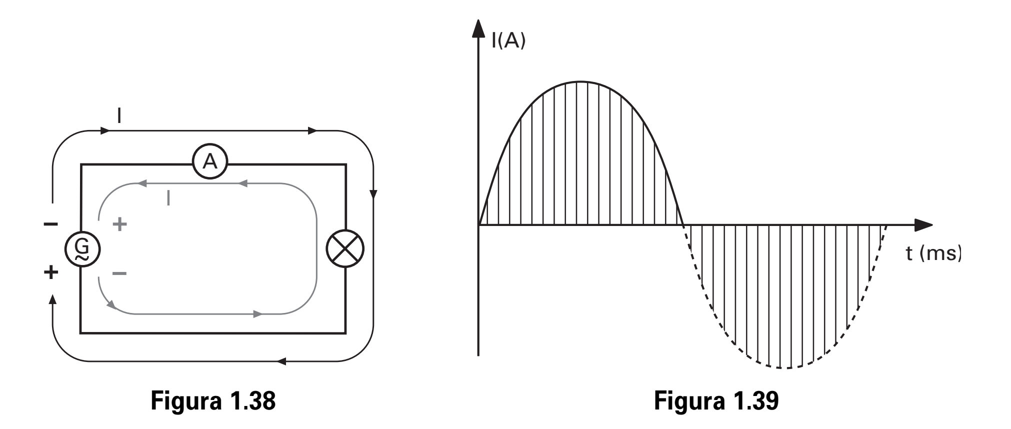


Figura 1.38 Figura 1.39

En un principio cabría pensar que veríamos a la lámpara encenderse y apagarse rápidamente, siguiendo los rápidos cambios de la corriente. Pero en la realidad no podemos ver este fenómeno, ya que el ojo humano no es capaz de percibirlo.

Dado que la corriente alterna es más fácil de producir, y que posee una serie de características que hacen más fácil su transporte, su campo de aplicación es muy amplio. Debido a la importancia que posee la C.A. nos dedicaremos a su estudio en profundidad en el tomo 2 de este curso.

Tensión eléctrica. Fuerza electromotriz

Como ya hemos estudiado, en un circuito el generador es el encargado de crear la diferencia de cargas. Para crear esta diferencia de cargas, el generador tiene que arrancar electrones del polo positivo y depositarlos en el polo negativo. Para realizar esta tarea el generador necesita desarrollar una energía: " A la fuerza necesaria para trasladar los electrones desde el polo positivo al negativo y así crear la diferencia de cargas se le denomina *fuerza electromotriz (f.e.m.)"*.

Es la f.e.m. la que permite la circulación de electrones; como su palabra indica: fuerza electro-motriz, que mueve los electrones.

A la diferencia de cargas se la llama de otra forma: diferencia de potencial o tensión eléctrica (símbolo V), y su unidad de medida es el voltio (V). La f.e.m. de un generador se mide también en voltios.

1 milivoltio = 1 mV = 0,001 V
1 Kilovoltio = 1 KV = 1000 V

Para comprender aún mejor todas las magnitudes que aparecen en un circuito eléctrico, vamos a hacer una comparación entre un circuito hidráulico y un circuito eléctrico (véase Figura 1.40).

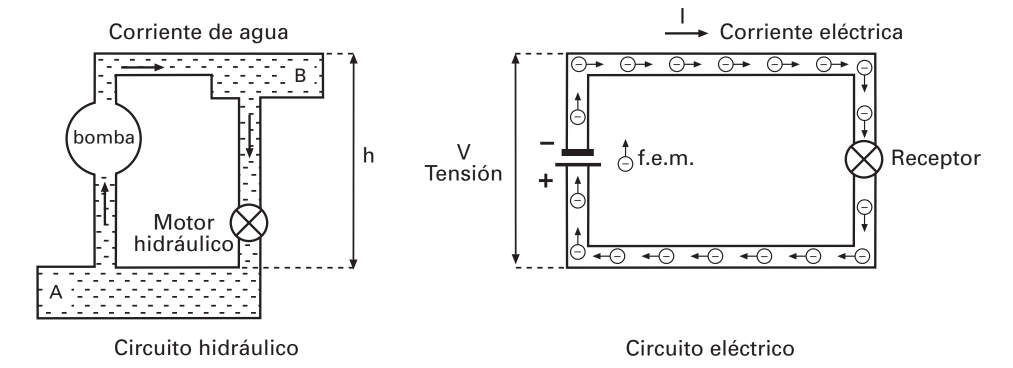


Figura 1.40

- *La bomba de agua eleva el agua del depósito A hasta el B, lo que crea una diferencia de alturas entre ambos depósitos* = El generador eléctrico arranca los electrones de la placa positiva y los deposita en la negativa, lo que crea una diferencia de cargas o tensión entre los bornes de la lámpara.
- *El depósito B, al estar más alto que el A, adquiere una energía potencial, pudiendo luego el agua descender hacia A y mover así el motor hidráulico* = El defecto de cargas negativas del polo positivo atrae con fuerza a los electrones en exceso del polo negativo, a través del circuito, produciéndose un movimiento de electrones, o corriente eléctrica por el filamento de la lámpara, que la hace lucir.

Medida de la tensión

Para medir la tensión eléctrica, se precisa un aparato de medida que sea capaz de captar el desnivel eléctrico o diferencia de cargas entre un punto y otro.

El voltímetro se conecta siempre entre los dos puntos entre los que se quiere determinar la tensión.

Esta forma de conectar el voltímetro se denomina “conexión en paralelo o derivación” (Figura 1.41).



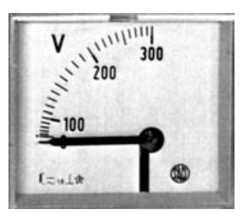


Figura 1.41

Experiencia 1.4

Toma un voltímetro (o en su defecto un polímetro) y mide la tensión que aparece entre los polos de una pila (Figura 1.42). De la misma manera que se hizo al medir la intensidad de la corriente, al hacer las conexiones cuida que el aparato de medida sirva para medir corriente continua, que las polaridades sean las correctas y que la escala elegida sea la adecuada con la magnitud a medir.

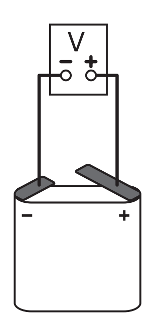


Figura 1.42

Resúmen de Conceptos

Los efectos fundamentales que produce la corriente eléctrica son: térmico, luminoso, químico y magnético.

El causante en todo momento de la electrización de los cuerpos es el electrón, ya que posee carga y movilidad para poder desplazarse por los materiales. A partir de estos dos conceptos es posibles que exista la electricidad.

Se conoce como carga eléctrica de un cuerpo al exceso o defecto de electrones que éste posee: *Carga negativa significa exceso de electrones; Carga positiva significa defecto de electrones.*

La unidad de carga eléctrica es el **culombio** (1 culombio = $6{,}3 \cdot 10^{18}$ electrones).

Al movimiento de electrones que se establece por el conductor eléctrico se le denomina **corriente eléctrica**.

A la diferencia de cargas que establece entre los dos cuerpos cargados eléctricamente, y que es la causante del movimiento de electrones, se la conoce por otro nombre: **tensión o diferencia de potencial**. Su unidad de medida el voltio (V).

Al dispositivo que se encarga de separar las cargas y producir diferencia de potencial en el circuito se le conoce como generador.

La intensidad de la corriente eléctrica es la cantidad de electricidad que recorre un circuito en la unidad de tiempo. Su unidad de medida es el amperio (A).

El voltímetro se conecta en paralelo, mientras que el amperímetro se conecta en serie.

Una corriente continua se caracteriza porque los electrones libres siempre se mueven en el mismo sentido por el conductor y con una intensidad constante.

Una corriente alterna se caracteriza porque el flujo de electrones se mueve por el conductor en un sentido y en otro, y además el valor de la corriente eléctrica es variable.

Actividades

1.1. ¿Qué ocurre si se acercan un elemento de ebonita y otro de vidrio una vez frotados?

a. ❑ Se repelen

b. ❑ Se atraen

c. ❑ Se cargan de electricidad

1.2. ¿Qué ocurre cuando se conectan por un conductor dos cuerpos cargados de electricidad de diferente polaridad?

a. ❑ Se atraen

b. ❑ Se repelen

c. ❑ Aparece un flujo de electrones por el conductor hasta que se descargan

1.3. La electricidad existe gracias a que:

a. ❑ El electrón posee carga y movilidad

b. ❑ El protón posee carga y movilidad

c. ❑ Los electrones poseen carga positiva

1.4. El generador en un circuito eléctrico:

a. ❑ Produce un consumo de energía eléctrica

b. ❑ Es un elemento de control del circuito

c. ❑ Produce una diferencia de cargas entre sus polos e impulsa a moverse a los electrones

1.5. ¿Cuál es el símbolo y la unidad de la tensión e intensidad de la corriente, respectivamente?

a. ❑ V (vatio), A (voltio)

b. ❑ V (voltio), A (amperio)

c. ❑ V (vatio), mA (miliamperio)

1.6. Calcula la intensidad de corriente que ha fluido por un conductor si, en 2 minutos y 20 segundos, se han trasladado $18{,}9 \cdot 10^{18}$ electrones.

Resultado: 21 mA

2 Resistencia eléctrica

Conductores y aislantes

Para el buen funcionamiento de un circuito eléctrico existen dos elementos básicos, los conductores y los aislantes. Unos tienen tanta importancia como los otros, mientras que los primeros permiten el paso de la corriente con una relativa facilidad, los segundos la bloquean.

Así, por ejemplo, un cable eléctrico, como los que hemos utilizado para las experiencias, está formado por un alambre metálico de cobre (el conductor) y por un recubrimiento de plástico (el aislante) que impide que la corriente se fuge hacia otros lugares no deseados y evita fallos y descargas eléctricas indeseables (Figura 2.1).



Figura 2.1

Los cuerpos aislantes de la electricidad se caracterizan por impedir el paso de la corriente eléctrica a través de ellos. Este fenómeno se debe a que los electrones se encuentran ligados fuertemente a sus átomos y para arrancarlos es necesario aplicar mucha energía (someter al cuerpo a una elevada tensión).

Los cuerpos aislantes tienen tanta importancia como los conductores en el mundo de la industria de materiales eléctricos, ya que gracias a ellos podemos aislar de la electricidad unos cuerpos de otros. Son buenos aislantes: ***exafloruro de azufre (SF_6), cámaras de vacío, porcelana, aceite mineral, caucho, barniz, vidrio, algodón, seda, papel, plástico, aire seco, etc.***

No todos los aislantes poseen el mismo poder de aislamiento, así por ejemplo, son buenos aislantes el exafloruro de azufre, el vacío, los materiales plásticos, el vidrio y el aire seco. Mientras que los textiles vegetales son poco aislantes. Más adelante estudiaremos como se puede medir el poder aislante de un material.

En la actualidad la tecnología de los aislantes es quizás más importante que la de los conductores, sobre todo si hablamos de los materiales que se utilizan para las redes de alta y media tensión. No hay que olvidar que con tensiones elevadas, del orden de 440 KV, 220 KV, etc., la electricidad se puede abrir paso con facilidad hasta por un aislante, pudiendo provocar accidentes, o simplemente hacer inviable el transporte a tensiones elevadas. En este campo se ha avanzado mucho en la fabricación de materiales con una alta capacidad de aislamiento.

Los plásticos elaborados en diferentes formas son los grandes protagonistas de los aislantes, tanto en baja como en media tensión (PVC, politileno, etc.)

El exafloruro de azufre es un gas que posee una altísima capacidad de aislamiento, lo que permite aproximar las partes activas de una instalación sin que haya peligro.

Las cámaras de vacío resultan un aislante fabuloso en interruptores de media tensión.

La porcelana no es tan buen aislante, pero al soportar altas temperaturas es ideal para algunas aplicaciones (portalámparas, etc.)

A diferencia de los aislantes, los conductores permiten con facilidad el movimiento de electrones por su estructura molecular. Prácticamente, todos los metales son buenos conductores, pero unos lo son mejor que otros.

A continuación se expone una lista en la que aparecen clasificados algunos materiales conductores. Comencemos por los mejores y terminemos por los peores:

Platino - plata - cobre - oro - aluminio - cinc - estaño - hierro - plomo - maillechort - mercurio - nicrón - carbón.

La plata es un excelente conductor de la electricidad, pero debido a su alto coste, se emplea solamente cuando sus propiedades sean particularmente interesantes, como en los contactos de apertura y cierre de circuitos.

El material más empleado es el cobre, que conduce casi tan bien como la plata y su coste es muy inferior.

El aluminio se utiliza en las líneas de transporte, ya que su peso es menor que el del cobre.

Por otro lado, se fabrican materiales a base de aleaciones como el nicrón (níquel-cromo), el constantán (cobre-níquel), el ferroníquel (hierro-niquel) el maillechort

(cobre-cinc-níquel) y otras muchas más, que poseen la característica de ser mucho peor conductores que el cobre, lo que les hace útiles como materiales resistivos para la fabricación de resistencias (reostatos, elementos calefactores, etc.)

El carbón es bastante mal conductor lo que le hace ideal para la fabricación de pequeñas resistencias para circuitos electrónicos.

Resistencia eléctrica

La resistencia eléctrica como unidad de medida nos va a ayudar a diferenciar los cuerpos que son mejores conductores de los que son peores, de tal manera que podremos indicar que un mal conductor posee mucha resistencia eléctrica, mientras que uno bueno tiene poca. De esta forma podemos decir que:

☞ *"La resistencia eléctrica es la mayor o menor oposición que ofrecen los cuerpos conductores al paso de la corriente eléctrica".*

Este fenómeno se podría explicar así: cuando los electrones circulan por un conductor, éstos tienen que moverse a través de todos los átomos, produciéndose una especie de rozamiento (resistencia al movimiento de electrones) que se transforma en calor. Estos choques son menores en los buenos conductores que en los malos.

La unidad de medida de la resistencia eléctrica (símbolo *R*) es el ohmio y se representa por la letra griega omega Ω.

1 miliohmio = 1 mΩ = 0,001 Ω

1 Kilohmio = 1 KΩ = 1.000 Ω

1 Megaohmio = 1 MΩ = 1.000.000 Ω

Los símbolos más utilizados para la resistencia son los representados en la Figura 2.2.

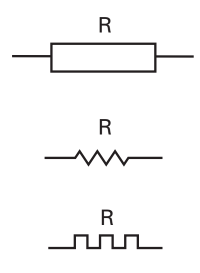


Figura 2.2

Medida de la resistencia eléctrica

El aparato que se utiliza para medir la resistencia eléctrica es el óhmetro. Para medir el valor de una resistencia, bastará con conectar los extremos de ésta a las puntas del óhmetro (Figura 2.3).

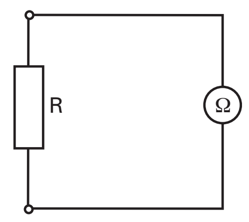


Figura 2.3

Existen muchos tipos de óhmetros, uno de los más conocidos y más utilizado para medir resistencias de una forma aproximada es el que incorpora el polímetro (Figura 2.4). El puente de Wheatstone es otro aparato de medida para medir resistencias que se utiliza en aquellos casos que se quiera dar una mayor precisión en la medida.



Figura 2.4

> ***Experiencia 2.1***
>
> Consigue un óhmetro (por ejemplo, el que se incluye en el polímetro) y mide la resistencia de varias lámparas y de cualquier otro aparato eléctrico que tengas a tu alcance.

Ley de Ohm

Hasta ahora hemos estudiado con detenimiento las magnitudes eléctricas: intensidad de la corriente, tensión y resistencia. En la práctica se nos pueden presentar problemas en los que conozcamos dos de estas magnitudes y tengamos que determinar la tercera. Para resolver estos problemas, y otros tantos que se presenten en la práctica, es necesario aplicar una fórmula que nos relacione las tres magnitudes eléctricas conocidas: *I*, *V*, *R*.

$$I = \frac{V}{R}$$

El físico Ohm, basándose en un experimento, determinó que la intensidad de la corriente que recorre un circuito eléctrico es directamente proporcional a la tensión aplicada (a más tensión, más intensidad), e inversamente proporcional a la resistencia eléctrica (a más resistencia, menos intensidad).

Veamos cómo se puede explicar esta relación: al conectar una resistencia a los bornes de una pila, aparece una corriente eléctrica que circula desde el polo negativo de la pila atravesando dicha resistencia, hasta el positivo (Figura 2.5). *Recuerda que si existe corriente eléctrica es gracias a que el generador traslada las cargas del polo positivo al negativo, creando así una diferencia de cargas, que nosotros llamamos tensión eléctrica.*

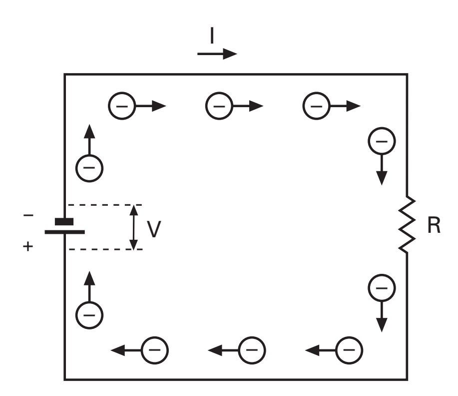


Figura 2.5

Cuanto mayor es la tensión eléctrica, con mayor fuerza atraerá el polo positivo de la pila a los electrones que salen del negativo y atraviesan la resistencia, y por tanto, será mayor también la intensidad de la corriente por el circuito.

Cuanto mayor sea el valor óhmico de la resistencia que se opone al paso de la corriente eléctrica, menor será la intensidad de la misma.

Ejemplos

2.1 Calcular la intensidad que circula por el filamento de una lámpara incandescente de 10 ohmios de resistencia, cuando está sometida a una tensión de 12 voltios.

Solución:

$$I = \frac{V}{R} = \frac{12}{10} = 1,2 \text{ A}$$

La ley de Ohm se puede ampliar despejando, en la fórmula, los valores de V y de R, obteniéndose entonces las siguientes expresiones:

$$I = \frac{V}{R} \qquad V = R \cdot I \qquad R = \frac{V}{I}$$

2.2 Se quiere determinar la resistencia eléctrica del filamento de una lámpara incandescente. Para ello, se somete a la lámpara a una tensión de 220 V y, mediante un amperímetro intercalado en serie, se mide el paso de una intensidad de corriente de 0,2 A (Figura 2.6).

Solución:

$$R = \frac{V}{I} = \frac{220}{0,2} = 1.100 \ \Omega$$

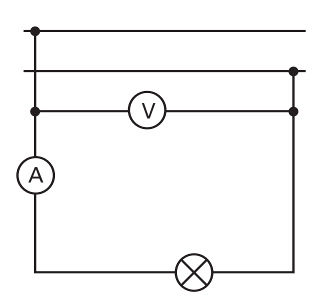


Figura 2.6

2.3 Es conocido que en condiciones desfavorables, es decir, con la piel húmeda, la resistencia del cuerpo humano es del orden de 2.500 Ω. ¿Qué tensión será suficiente para provocar, en estas condiciones, el paso de una corriente peligrosa, de 30 mA, por el cuerpo humano?

Solución:

$$V = R \cdot I = 2.500 \cdot 0,03 = 75 \text{ V}$$

2.4 Se sabe que una intensidad de corriente de 30 mA puede ocasionar la muerte por fibrilación cardíaca. La resistencia eléctrica del cuerpo humano suele ser, por termino medio y en condiciones normales, del orden de 5000 Ω. Si una persona, por accidente, se pone en contacto con una red de 220 V, ¿cuál será la corriente que atraviese su cuerpo? ¿Existe algún peligro de muerte?

Solución:

$$I = \frac{V}{R} = \frac{220}{5.000} = 0,044 \text{ A} = 44 \text{ mA}$$

Sí existe el peligro ya que la intensidad que recorre el cuerpo del accidentado es superior a 30 mA.

Experiencia 2.2

Con un sencillo montaje práctico vamos a comprobar la ley de Ohm. Para ello conecta una pila a una resistencia, para a continuación medir, mediante un polímetro, la tensión en bornes de la resistencia, la intensidad de la corriente del circuito, así como la resistencia óhmica de dicha resistencia. Con los resultados obtenidos de las medidas comprueba si se cumple la relación $I = V/R$. Ahora conecta otra resistencia de diferente valor y compara los resultados.

Resúmen de Conceptos

Los cuerpos aislantes de la electricidad se caracterizan porque los electrones de su estructura atómica están fuertemente ligados con sus átomos, lo que impide el paso de la corriente eléctrica a través de ellos.

Los conductores se caracterizan por poseer gran cantidad de electrones libres, lo que facilita el movimiento de los mismos por la estructura molecular.

La unidad de medida de la resistencia eléctrica (símbolo R) es el ohmio y se representa por la letra griega omega Ω.

El aparato que se utiliza para medir la resistencia eléctrica es el óhmetro. Para medir el valor una resistencia, bastará con conectar los extremos de ésta a las puntas del óhmetro.

$I = \frac{V}{R}$ La ley de Ohm nos indica que la intensidad de corriente de un circuito es directamente proporcional a la tensión e inversamente proporcional a la resistencia.

Actividades

2.1. Para medir la resistencia eléctrica:

a. ❑ Se conectan los dos terminales del óhmetro con los de la resistencia a medir.

b. ❑ Se conecta la resistencia al circuito para posteriormente realizar la medida con el óhmetro.

c. ❑ Se utiliza un resistómetro.

2.2. ¿Cuál es la cualidad por la que se diferencian los buenos conductores de los malos?

a. ❑ Intensidad óhmica.

b. ❑ Resistencia eléctrica.

c. ❑ Tensión resistiva.

2.3. Se dispone de una linterna que funciona con una pila de 1,5 V; la lámpara tiene una resistencia de 50 Ω. Calcular la intensidad del circuito.

Resultado: 30 mA

2.4. Calcular la tensión de funcionamiento de un horno eléctrico que posee una resistencia de 22 Ω, y que al ser conectado, se establece por él una intensidad de 5,7 A.

Resultado: 125 V

2.5. ¿Qué resistencia tiene una plancha eléctrica que consume 2 A conectada a 220 V?

Resultado: 110 Ω

3 Resistencia eléctrica de los materiales

Como ya pudimos estudiar con anterioridad, la resistencia de los diferentes materiales depende fundamentalmente de su naturaleza. Por otro lado, las dimensiones de los mismos también influyen de una forma decisiva en su resistencia final. Esto tiene una especial importancia en los cálculos de la sección de conductores para instalaciones eléctricas, ya que una resistencia elevada en los mismos provoca su calentamiento y su probable deterioro.

Resistencia de un conductor

Si midiésemos la resistencia de un conductor de cobre de un metro de longitud y de un milímetro cuadrado de sección, obtendríamos un resultado de 0,017 Ω (Figura 3.1). Este resultado nos indica que por cada metro de conductor de cobre de un milímetro cuadrado de sección, la resistencia del mismo será de 0,017 ohmios.

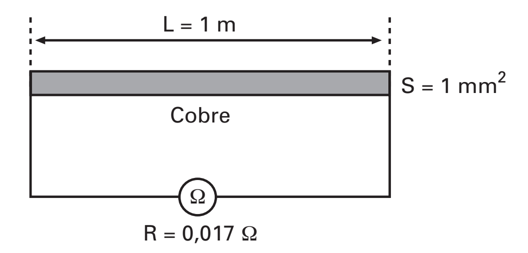


Figura 3.1

Por otro lado es lógico pensar que, si la resistencia eléctrica es la dificultad que ofrece un conductor al paso de la corriente eléctrica, esta dificultad irá aumentando con el camino que tiene que recorrer; es decir, a mayor longitud, mayor será la resistencia. Así, por ejemplo, si ahora midiésemos la resistencia de un conductor de 2 m de cobre de 1 mm², observaríamos que la resistencia ha aumentado al doble (0,034 Ω).

La resistencia de un conductor aumenta con su longitud

Si, por el contrario, se aumenta la sección del conductor, los electrones tendrán más libertad para moverse y, por tanto, la resistencia será menor. Así, por ejemplo si midiésemos la resistencia de un conductor de 1 m de cobre de 2 mm² daría como resultado un valor óhmico de la mitad (0,0085 Ω).

La resistencia de un conductor disminuye con su sección

Teniendo en cuenta todas estas consideraciones, la expresión matemática necesaria para determinar la resistencia de un conductor de cobre (R_{cu}) podría quedar así:

$$R_{cu} = 0{,}0017 \frac{L}{S}$$

0,0017 = *Resistencia en ohmios por cada metro de conductor de* 1 mm².
L = *Longitud del conductor en* m.
S = *Sección del conductor en* mm².

Lógicamente esta fórmula sólo será válida para calcular la resistencia de conductores de cobre ¿Qué expresión utilizaremos entonces para otros materiales? Como ya se dijo, existen materiales que son mejores conductores que otros; así, por ejemplo, el aluminio es peor conductor que el cobre. De tal forma, que si midiésemos ahora la resistencia de un conductor de aluminio de un metro de longitud y de un milímetro cuadrado de sección, obtendríamos un resultado igual a 0,028 ohmios.

Está claro que cada material tendrá un determinado valor de resistencia por cada metro y milímetro cuadrado de sección del mismo. A este valor se le denomina: "coeficiente de resistividad" y se escribe con la letra griega ρ.

La fórmula general para calcular la resistencia de cualquier tipo de conductor podría quedar así:

$$R = \rho \frac{L}{S}$$

ρ = *coeficiente de resistividad* (Ω · mm²/m)
L = *longitud del conductor* (m)
S = *sección del conductor* (mm²)
R = *resistencia del conductor* (Ω)

En la Tabla 3.1 se expone una lista con el coeficiente de resistividad, a 20 °C de temperatura, de los materiales más utilizados.

Material	Símbolo	ρ (Ωmm²/m)
Plata	Ag	0,0163
Cobre	Cu	0,017
Aluminio	Al	0,028
Cinc	Zn	0,061
Latón	Cu-Ni	0,07
Estaño	Sn	0,12
Hierro	Fe	0,13
Plomo	Pb	0,204
Maillechort	Cu-Zn-Ni	0,30
Constantán	Cu-Ni	0,50
Ferroníquel	Fe-Ni	0,80
Mercurio	Hg	0,957
Nicrón	Ni-Cr	1
Carbón	C	63

Tabla 3.1

Ejemplos

3.1 ¿Qué resistencia tendrá un conductor de cobre de 20 metros de longitud y 1 mm² de sección?

Solución:

$$R = \rho \frac{L}{S} = 0{,}017 \frac{20}{1} = 0{,}34\ \Omega$$

3.2 ¿Y un conductor de aluminio de las mismas dimensiones?

Solución: $R = ... = 0{,}56\ \Omega$

3.3 ¿Qué sección poseerá un conductor de constatán de 12 metros de longitud, si se ha medido una resistencia entre sus terminales de 6 Ω?

Solución:

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad \text{despejando} \quad S = \rho \frac{L}{R} = 0{,}5 \frac{12}{6} = 1\ \text{mm}^2$$

3.4 Se desea medir la longitud de una bobina de cobre. Para no tener que desenrollar el conductor, se mide con un óhmetro conectado a los extremos de la bobina una resistencia de 1 Ω. Mediante un calibre medimos un diámetro de 0,5 mm (véase Figura 3.2).

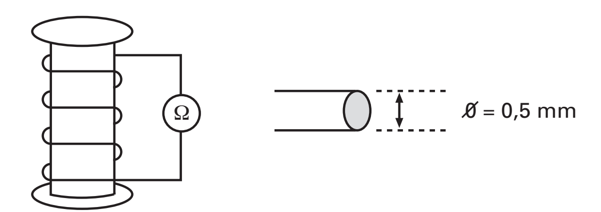


Figura 3.2

Solución: Como la sección es circular: $S = \pi \cdot r^2 = 3{,}1416 \cdot 0{,}25^2 = 0{,}2\ \text{mm}^2$

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad \text{despejando} \quad L = \frac{R \cdot S}{\rho} = \frac{1 \cdot 0{,}2}{0{,}017} = 11{,}8\ \text{mm}^2$$

Influencia de la temperatura sobre la resistividad

Experiencia 3.1

Consigue una lámpara de linterna y mide con el óhmetro su resistencia en frío. Seguidamente, conecta la lámpara a una pila y mediante un amperímetro y un voltímetro determina los valores de *I* y de *V*. Con ellos determina el valor de la resistencia óhmica del filamento en caliente, aplicando la ley de Ohm. Compara los resultados obtenidos. ¿Obtuviste los mismos resultados en los dos casos ?

Seguro que no. Al medir la resistencia con el óhmetro, la lámpara está apagada y, por lo tanto, el filamento se encuentra frío, es decir, a la temperatura ambiente. Por otro lado, cuando aplicamos la ley de Ohm para calcular la resistencia, se hace con los datos correspondientes al estado de encendido de la lámpara. Hay que tener en cuenta que en ese estado, el filamento se encuentra a una temperatura de unos 2.000 ºC. Y es que la resistencia eléctrica se eleva sustancialmente en casi todos los conductores al elevarse su temperatura, de aquí que en una lámpara incandescente la resistencia en frío sea muy inferior a cuando está caliente.

Por lo general, la resistencia aumenta con la temperatura en los conductores metálicos. Este aumento depende del incremento de temperatura y de la materia de que esté constituido dicho conductor.

$$R_{t°} = R_0(1 + \alpha \cdot \Delta t°)$$

$R_{t°}$ = *Resistencia en caliente*
R_0 = *Resistencia a* 0 °C
α = *Coeficiente de temperatura*
$\Delta t°$ = *Elevación de temperatura en* °C

Con esta expresión se puede calcular la resistencia a un temperatura dada ($R_{t°}$), conociendo la temperatura de la resistencia en frío (R_0), la elevación de la temperatura (Δt^o) y el coeficiente de temperatura (α), que será diferente para cada material.

En la Tabla 3.2 se dan los coeficientes de temperatura de los materiales más utilizados.

Material	α
Oro	0,0035
Plata	0,0036
Aluminio	0,00446
Cobre	0,0039
Estaño	0,0044
Constantán	0,0001
Wolframio	0,0005
Hierro	0,00625
Ferroníquel	0,00093
Maillechort	0,00036

Tabla 3.2

El aumento de la resistencia con la temperatura es a veces un gran inconveniente; así ocurre, por ejemplo, en las medidas eléctricas que pueden verse distorsionadas por este fenómeno. Por esta razón, es conveniente utilizar materiales con un bajo coeficiente de temperatura para la construcción de los aparatos de medida.

En otros casos este aumento de resistencia con la temperatura puede ser beneficioso; como por ejemplo, para medir temperaturas por medio de resistencias que poseen un alto coeficiente de temperatura (termómetros electrónicos).

De una forma especial, existen materiales en los cuales se reduce la resistencia al aumentar su temperatura. En estos casos se dice que poseen un coeficiente de temperatura negativo. En general, los materiales semiconductores pertenecen a este grupo. En especial existen resistencias construidas con semiconductores especialmente diseñadas para reducir su resistencia cuando aumenta la temperatura, como son las NTC.

Ejemplos

3.5 Medimos la resistencia de una fase de un bobinado de cobre de un motor antes de haber funcionado (a la temperatura de 0 °C), obteniendo un resultado de 4 ohmios. Determinar la resistencia que alcanzará cuando esté en funcionamiento a una temperatura de 75 °C.

Solución: $R_{t°} = R_0(1+\alpha \cdot \Delta t°)$

$$R_{75°} = 4 \cdot (1+0,0039 \cdot 75) = 5,2\ \Omega$$

3.6 ¿Cuál será el aumento de temperatura que experimenta una lámpara incandescente con filamento de wolframio, si al medir su resistencia a temperatura ambiente (20 °C) obtuvimos un resultado de 358 ohmios, habiéndose calculado una resistencia en caliente de 807 Ω?

Solución: Primero calculamos la resistencia a 0 °C:

$R_{t°} = R_0(1+\alpha \cdot \Delta t°)$ despejando $R_0 = \dfrac{R_{t°}}{(1+\alpha \cdot \Delta t°)} = \dfrac{358}{1+0,0005 \cdot 20} = 354,5\ \Omega$

a continuación despejamos $\Delta t° = (\dfrac{R_{t°}}{R_0} - 1)/\alpha = (\dfrac{807}{354,5} - 1)/0,0005 = 2.553\ °\mathrm{C}$

3.7 Determinar la corriente que aparecerá en la lámpara incandescente del ejemplo 3.6 al conectarla a 220 V y en lo siguientes casos: **a.** nada más conectarla, **b.** una vez encendida.

Solución a: Nada más conectar la lámpara, el filamento se encuentra a 20 °C y su resistencia es de 358 ohmios.

$$I = \frac{V}{R_{20°}} = \frac{220}{358} = 0,61\ \mathrm{A}$$

Solución b: Al aumentar la temperatura hasta los 2.573 °C, la resistencia aumenta su valor hasta 807 ohmios, produciéndose una disminución y estabilización de la corriente.

$$I = \frac{V}{R_{2573°}} = \frac{220}{807} = 0,27\ \mathrm{A}$$

Como se ha podido comprobar en la tabla de coeficientes de temperatura, existen aleaciones, como el constantán, que apenas varían con la temperatura, lo que las hace

ideales para la fabricación de resistencias en las que sea importante la estabilidad de su valor óhmico con los cambios de temperatura.

Los aislantes tienen una característica muy especial, su resistencia disminuye con la temperatura.

Cuando se disminuye mucho la temperatura de los conductores metálicos (cerca de los -273 °C) se puede llegar a alcanzar la ***superconductividad***. Es decir, ausencia absoluta de resistencia eléctrica. El paso de la corriente eléctrica por un superconductor no provoca ningún tipo de pérdida calorífica. Hoy en día se están consiguiendo grandes avances en la fabricación de materiales superconductores a temperaturas mucho más elevadas (entorno a los 150 grados bajo cero).

Resistencia de los aislantes

Ya explicamos que los materiales aislantes o dieléctricos tienen tanta importancia en las aplicaciones prácticas de la electricidad como los conductores. Gracias a los aislantes es posible separar las partes activas de una instalación con las inactivas, consiguiendo así instalaciones eléctricas que sean seguras para las personas que las utilizan.

Lo mismo que existen materiales que son mejores conductores que otros, también existen materiales con mayor capacidad de aislamiento que otros. De tal forma, que cuanto mayor es la resistividad de un aislante, mayor será su capacidad de aislamiento.

Dar una cifra exacta de la resistividad de cada uno de los aislantes es un poco complicado, ya que este valor se suele ver reducido por el grado de humedad y con la elevación de la temperatura.

Así, por ejemplo, el agua pura posee una resistividad aproximada de 10 $M\Omega \cdot m^2/m$, y la porcelana 10^{11} $M\Omega \cdot m^2/m$.

Rigidez dieléctrica

Otra forma de medir la calidad de aislamiento de un material es conociendo su rigidez dieléctrica.

La rigidez dieléctrica de un material es la tensión que es capaz de perforar al mismo (corriente eléctrica que se establece por el aislante). Lo cual quiere decir que los materiales aislantes no son perfectos, ya que pueden ser atravesados por una corriente si se eleva suficientemente la tensión.

Así, por ejemplo en una tormenta eléctrica, la fuerte tensión entre la nube y tierra es capaz de perforar un buen aislante: el aire.

Cuando un aislante es perforado por la corriente, la chispa que lo atraviesa suele provocar la destrucción del mismo, sobre todo si se tratara de un material sólido, ya que las temperaturas que se desarrollan suelen ser altísimas.

Conocer la tensión que es capaz de perforar un aislante es muy importante. De esta forma, podremos elegir los materiales más adecuados en el momento de aislar una línea, o cualquier aparato eléctrico, consiguiendo así evitar averías, cortocircuitos y accidentes a las personas que manipulan instalaciones sometidas a tensiones peligrosas.

La tensión necesaria para provocar la perforación del dieléctrico viene expresada en kilovoltios por centímetro de espesor del aislante. Este dato no es constante y depende de la humedad contenida en el aislante, de la temperatura, de la duración de la tensión aplicada, y de otras muchas variables.

Así, por ejemplo, la rigidez dieléctrica de:

Agua	12 KV/mm	Papel	16 KV/mm
Aceite mineral	4 KV/mm	Cloruro de polivinilo	50 KV/mm
Aire seco	3,1 KV/mm	Politileno	16 KV/mm

Cuando se selecciona un conductor eléctrico, aparte de la sección que resulte ser la más adecuada, es muy importante tener en cuenta la tensión de servicio de la instalación donde va a trabajar. En el Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión se indican las tensiones que deberán soportar los aislantes de los conductores eléctricos con un margen de seguridad. Siguiendo estas recomendaciones se fabrican, por ejemplo, conductores de 500 V, 750 V y 1.000 V para baja tensión.

Resúmen de Conceptos

La resistencia de un conductor depende de su naturaleza, aumenta con su longitud y disminuye con su sección.

$$R = \rho \frac{L}{S}$$

ρ = Coeficiente de resistividad (Ω . mm²/m)
L = Longitud del conductor (m)
S = Sección del conductor (mm²)
R = Resistencia del conductor (Ω)

La resistencia de los conductores metálicos aumenta, por lo general, con la temperatura.

$$R_{t^\circ} = R_0(1 + \alpha \cdot \Delta t^\circ)$$

R_{t° *= Resistencia en caliente*
R_0 *= Resistencia a 0 °C*
α *= Coeficiente de temperatura*
Δt° *= Elevación de temperatura en °C*

La rigidez dieléctrica de un material es la tensión que es capaz de perforar al mismo.

Actividades

3.1. ¿Cuándo será más alta la intensidad de corriente por una lámpara incandescente? Justo al cerrar el interruptor y comenzar su encendido o una vez que está encendida.

a. ❑ Una vez encendida, ya que es cuando más consume.

b. ❑ Justo al cerrar el interruptor ya que la resistencia del filamento en frío es pequeña y por lo tanto la intensidad de la corriente será más elevada.

c. ❑ La intensidad de la corriente es la misma en todo momento.

3.2. ¿Cuál es la sustancia que más se aproximaría al superaislante?

a. ❑ El vacío, ya que al no existir en él materia no hay electrones que se puedan poner en movimiento.

b. ❑ El aire.

c. ❑ Los plásticos sintéticos.

3.3. ¿Qué característica se utiliza habitualmente para medir el poder de aislamiento de un material?

a. ❑ El grosor del aislante.
b. ❑ La rigidez dieléctrica.
c. ❑ La intensidad máxima que soporta.

3.4. ¿Qué material es necesario utilizar para conseguir que un metro de conductor de 0,5 mm^2 posea una resistencia de 56 mΩ?

a. ❑ El cobre.
b. ❑ El aluminio.
c. ❑ La plata.

3.5. ¿Qué tendrá más resistencia, un conductor de cobre de 100 m de longitud y 6 mm^2 de sección, o uno de aluminio de la misma longitud y de 10 mm^2?

a. ❑ Conductor de cobre.
b. ❑ Conductor de aluminio.
c. ❑ Aproximadamente igual.

3.6. ¿Cuál será la sección de un conductor de cinc de 5 metros, si posee una resistencia de 1 ohmio?

Resultado: 0,3 mm^2

3.7. Se quiere determinar la longitud de un carrete de hilo de cobre esmaltado de 0,25 mm de diámetro. Para ello, se mide con un óhmetro su resistencia, obteniéndose un resultado de 34,6 Ω.

Resultado: 100 m

3.8. La resistencia a 20 °C de una bobina de cobre es de 5 ohmios. Calcula la resistencia de la misma a 80 °C.

Resultado: 6,09 Ω

3.9. Consigue el Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión y evalúa el campo de aplicación de los conductores eléctricos según las tensiones de servicio de los mismos.



Potencia y energía eléctrica

Potencia eléctrica

La unidad de potencia eléctrica es el vatio (W). Si nos preguntan qué lámpara luce más, una de 60 W o una de 40 W, la respuesta sería muy clara: la de 60 W, que es la que más potencia posee. Pero, ¿qué es la potencia eléctrica?

En la asignatura de física, se suele definir a la potencia como la rapidez con la que se ejecuta un trabajo, es decir la relación que existe entre el trabajo realizado y el tiempo invertido en realizarlo.

Como todos sabemos, el trabajo se produce gracias a la energía. Trabajo y energía son dos conceptos que dicen lo mismo:

$$\text{Potencia} = \frac{\text{Trabajo}}{\text{Tiempo}}$$

$$\text{Potencia} = \frac{\text{Energía}}{\text{Tiempo}}$$

$$P = \frac{E}{t}$$

P = *Potencia en vatios (W)*
E = *Energía en julios (J)*
t = *Tiempo en segundos*

Ejemplos

4.1 Determinar la potencia que debe desarrollar un ascensor que pese 500 Kg si para subir al 5º piso (a una distancia de 25 m del suelo) emplea un tiempo de 50 segundos al moverse a una velocidad de 0,5 m/s. Calcular también la energía consumida.

Solución: El trabajo que necesita un móvil para desplazarse a una cierta distancia es el producto de la fuerza aplicada, multiplicada por la distancia recorrida:

$$E = F \cdot e = 4.905 \cdot 25 = 122.625 \text{ J}$$

(pasamos los Kg a Nw: $500 \text{ Kg} \cdot 9{,}81 = 4.905 \text{ Nw}$)

$$P = \frac{E}{t} = \frac{122.625}{50} = 2.452{,}5 \text{ W} \approx 2{,}5 \text{ KW}$$

Para determinar la potencia también nos podíamos haber valido de la siguiente expresión que nos indica que la potencia desarrollada por un móvil es el producto de la fuerza aplicada por la velocidad del mismo:

$$P = F \cdot V = 4.905 \cdot 0{,}5 = 2.452{,}5 \text{ W}$$

☞ *¿Cómo será la potencia a desarrollar por el ascensor si queremos que suba al quinto piso en tal sólo 20 segundos?*

La fuerza que mueve a un móvil es similar a la tensión que impulsa a moverse a los electrones por un circuito eléctrico. Por otro lado, la velocidad con que se mueve un móvil se puede comparar con la cantidad de electrones que fluyen en un circuito eléctrico en la unidad de tiempo, es decir de la intensidad de la corriente eléctrica. Según esto, la expresión de la potencia podría quedar así.

$$P = V \cdot I$$

☞ *La potencia eléctrica es el producto de la tensión por la intensidad de la corriente.*

Ejemplos

4.2 En una habitación existe una base de enchufe de 16 amperios. Se quiere determinar la potencia máxima del aparato eléctrico que se puede conectar al enchufe, teniendo en cuenta que la tensión es de 220 voltios.

Solución: Que la base de enchufe sea de 16 amperios, quiere decir que ésta es la máxima intensidad que puede circular por él sin que se caliente excesivamente. Luego la potencia máxima que podrá suministrar será:

$$P = V \cdot I = 220 \cdot 16 = 3.520 \text{ W}$$

4.3 Calcular la potencia que consume un horno eléctrico si se conecta a una tensión de 220 V y su resistencia es de 50 Ω.

Solución: Primero calculamos la intensidad, aplicando la ley de Ohm:

$$I = \frac{V}{R} = \frac{220}{50} = 4,4 \text{ A}$$

$$P = V \cdot I = ... = 968 \text{ W}$$

4.4 La potencia de una cocina eléctrica es de 3,5 KW. Se quiere saber si será suficiente con una base de enchufe de 25 A para conectarla a una red de 220 V.

Solución:

$$P = V \cdot I \quad \text{despejando} \quad I = \frac{P}{V} = \frac{3.500 \text{ W}}{220 \text{ V}} = 15,9 \text{ A}$$

Como la base de enchufe soporta hasta 25 A, está claro que es suficiente para conectar la cocina.

4.5 La placa de características de una plancha eléctrica indica que su potencia es de 500 W y su corriente nominal de 4 A. Calcular el valor de la resistencia de caldeo.

Solución: Primero calculamos el valor de la tensión:

$$P = V \cdot I \quad \text{despejando} \quad V = \frac{P}{I} = ... = 125 \text{ V}$$

Para calcular la resistencia nos valemos de la ley de Ohm:

$$I = \frac{V}{R} \quad \text{despejando} \quad R = \frac{V}{I} = \frac{125}{4} = 31,25\ \Omega$$

Este problema también se podía haber resuelto, determinando primero una fórmula que relacione P, I, y R:

$$P = V \cdot I, \quad V = R \cdot I \longrightarrow P = R \cdot I \cdot I \qquad P = R \cdot I^2$$

Despeja R de la fórmula obtenida y comprueba el resultado.

4.6 Se dispone de una resistencia calefactora para un horno eléctrico de la que sólo se conoce su potencia de trabajo: 700 W y el valor óhmico de la misma: 69 Ω. ¿A qué tensión se podrá conectar el horno para que funcione correctamente?

Solución: Este problema entraña un poco más de complejidad. Para resolverlo, habrá que encontrar primero, una fórmula que relacione P, V y R.

$$P = V \cdot I, \quad I = \frac{V}{R} \longrightarrow P = V \cdot \frac{V}{R} = \frac{V^2}{R} \qquad P = \frac{V^2}{R}$$

Despejando $V = \sqrt{P \cdot R} = \sqrt{700 \cdot 69} = 220 \text{ V}$

4.7 ¿Cuál será la pérdida de potencia que se producirá en los conductores de una línea eléctrica de cobre de 4 mm^2 de sección y de 100 m de longitud, que alimenta a un motor eléctrico de 1 KW a 220 V?

Solución: La potencia que se pierde en los conductores se puede calcular mediante la expresión $P_p = R_L \cdot I^2$, siendo R_L la resistencia de los conductores de la línea e I la intensidad que circula por ellos.

$$I = \frac{P}{V} = \frac{1.000}{220} = 4,55 \text{ A}$$

$$R_L = \rho \frac{L}{S} = 0,017 \cdot \frac{200}{4} = 0,85 \ \Omega$$

$$P_1 = R_L \cdot I^2 = 0,85 \cdot 4,55^2 = 17,6 \ W$$

Figura 4.1

Nota: se ha tomado 200 m de longitud de conductor, teniendo en cuenta que son 100 m de ida y 100 m de vuelta. La potencia que se pierde en el conductor se transforma en calor, que eleva su temperatura y puede llegar a perjudicarlo.

4.8 ¿Cuál será el aumento de temperatura que experimenta una lámpara incandescente de 60 W/220 V con filamento de wolframio, si al medir su temperatura en frío obtuvimos un resultado de 358 ohmios?

Solución: Primero calculamos la resistencia aproximada en caliente con la ayuda de las características de la lámpara:

$$P = \frac{V^2}{R} \quad \text{despejando} \quad R = \frac{V^2}{P} = ___ = 807 \ \Omega$$

$$R_{t^\circ} = R_0 (1 + \alpha \cdot \Delta t^\circ) \quad \text{despejando} \quad \Delta t^\circ = \left(\frac{R_{t^\circ}}{R_0} - 1 \right) / \alpha = ___ = 2.508 \ ^\circ\text{C}$$

Medida de la potencia eléctrica

El aparato que mide la potencia eléctrica es el vatímetro (Figura 4.3).

En realidad, el vatímetro mide por separado la tensión y la intensidad de la corriente, para después realizar la operación $\boldsymbol{P = V \cdot I}$ (Figura 4.2). Este aparato consta de dos bobinas; una amperimétrica y otra voltimétrica (Figura 4.4). La bobina amperimétrica posee unas características similares a la de un amperímetro: tiene una resistencia muy baja y se conecta en serie. La bobina voltimétrica posee las mismas características que las de un voltímetro: tiene una resistencia muy alta y se conecta en paralelo.

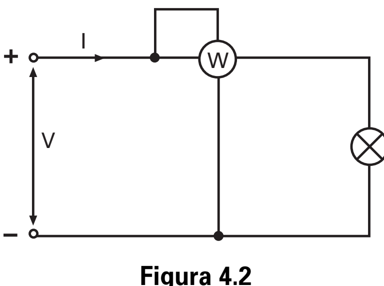


Figura 4.2

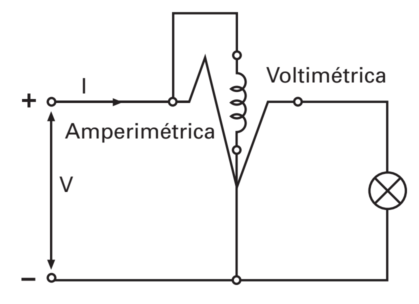


Figura 4.4

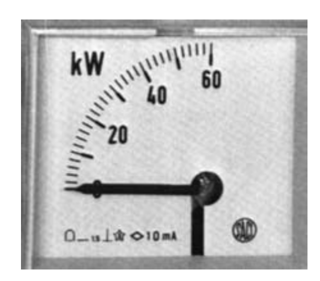


Figura 4.3

Experiencia 4.1

Con los datos obtenidos en las lecturas del voltímetro y del amperímetro de la experiencia 2.2, calcula la potencia que le correspondería a la resistencia utilizada en dicha experiencia. $P = V \cdot I =$ ...... = ... W

Ahora toma un vatímetro y mediante el esquema de conexiones de la Figura 4.2 mide su potencia.

Compara los resultados obtenidos por ambos métodos de medición. Lo más probable es que éstos no sean iguales. Esto nos indica que los aparatos de medida no son perfectos y que, por tanto, cometen errores. También hay que tener en cuenta los errores que hayamos podido cometer nosotros al tomar las medidas.

Energía eléctrica

De la expresión que relaciona la energía con la potencia se deduce que la energía es el producto de la potencia por el tiempo. El cálculo de la energía eléctrica consumida por un receptor es muy interesante, especialmente por los consumidores, ya que sobre él se establecen los costos que facturan las compañías eléctricas.

$$P = \frac{E}{t} \qquad \text{despejando} \qquad E = P \cdot t$$

¿Cuál es la unidad de medida de la energía eléctrica? Todo dependerá de las unidades que se tomen de la potencia y del tiempo.

E* = *P* · *t	
P (W) *t*(s)	*P* (KW) *t*(h)
E = W · s = Julios	*E* = KW · h = kilovatios-hora

El julio es la unidad perteneciente al sistema internacional. Como es muy pequeña, se suele utilizar más el KWh.

Ejemplos

4.9 Calcular la energía, en KWh y julios, consumidos por un calefactor de 500 W en 8 horas de funcionamiento.

Solución: $E = P \cdot t = 0{,}5 \text{ KW} \cdot 8 \text{ h} = 4 \text{ KWh}$

$500 \text{ W} = 500/1.000 = 0{,}5 \text{ KW}$

$E = P \cdot t = 500 \text{ W} \cdot 18.000 \text{ s} = 9.000.000 \text{ julios}$

$5 \text{ horas} = 5 \cdot 3.600 = 18.000 \text{ s}$

4.10 Se quiere determinar el gasto bimensual de un calefactor de 500 W, que funciona, por término medio, 4 horas al día. Precio del KWh: 16 ptas.

Solución: $E = P \cdot t = 0{,}5 \text{ KW} \cdot 240 \text{ h} = 120 \text{ KWh}$

$t = 60 \text{ días} \cdot 4 \text{ h} = 240 \text{ h}$

$\text{Gasto} = 120 \text{ KWh} \cdot 16 \text{ ptas} = 1920 \text{ ptas.}$

4.11 Cuánto tiempo podremos tener conectado un televisor de 150 W si deseamos gastar 100 ptas en término de energía eléctrica, siendo el precio del KWh de 17 ptas.

Solución:

$$\text{Gasto} = E \cdot \text{precio KWh} \qquad \text{despejando} \qquad E = \frac{\text{Gasto}}{\text{Precio KWh}} = \frac{100}{17} = 5{,}88 \text{ KWh}$$

$$E = P \cdot t \qquad \text{despejando} \qquad t = \frac{E}{P} = \frac{5{,}88}{0{,}15} = 39{,}2 \text{ horas}$$

Medida de la energía eléctrica

El aparato que mide la energía eléctrica consumida es el contador y, como todos bien sabemos, es el que nos dice, a fin de cuentas, lo que debemos pagar a la compañía eléctrica.

El contador se conecta exactamente igual que un vatímetro, y nos da la lectura de la energía gracias a que integra el producto de la potencia por el tiempo (Figura 4.5).

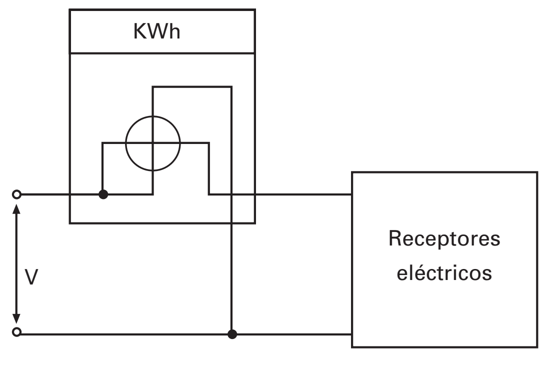


Figura 4.5

El contador de energía que más se está utilizando hasta ahora es el de inducción (Figura 4.6), que realiza la medida gracias a un sistema motorizado, que impulsa a girar un disco. La velocidad de dicho disco depende del producto de la tensión por la intensidad, es decir de la potencia. Existe un sistema que cuenta el número de vueltas y presenta una lectura directa de los KWh consumidos.



Figura 4.6

La tendencia hoy en día es a utilizar contadores de energía por impulsos. Estos aparatos de medida incorporan un sistema de medida electrónico que nos presenta la lectura en una pantalla digital. Además son capaces de enviar al centro de datos de la compañía eléctrica la información de la energía consumida en tiempo real a través de un módem y de la línea telefónica.

Resúmen de Conceptos

$$P = \frac{E}{t}$$

P = *Potencia en vatios* (W)
E = *Energía en julios* (J)
t = *Tiempo en segundos* (s)

$P = V \cdot I$ La potencia eléctrica es el producto de la tensión por la intensidad de la corriente.

$$P = R \cdot I^2 \qquad P = \frac{V^2}{R}$$

El aparato que mide la potencia eléctrica es el vatímetro.

$$E = P \cdot t$$

$E = W \cdot s$ = Julios
$E = W \cdot h$ = kilovatios-hora

El aparato que mide la energía eléctrica consumida es el contador de energía.

Actividades

4.1. Al conectar una lámpara a una toma de corriente de 100 V se miden por el circuito 750 mA. Determinar la potencia de la lámpara y su resistencia.

Resultado: P = 75 W, R = 133 Ω

4.2. ¿A qué tensión habrá que conectar una estufa de 750 W si su resistencia es de 75 Ω?¿Cuál será la intensidad de la corriente?

Resultado: V = 237 V, I = 3,16 A

4.3. Un calentador de agua presenta en su placa de características los siguientes datos: 3 KW/220 V. Determinar: **a.** Intensidad de la corriente y resistencia; **b.** Potencia si se conecta ahora a 125 V, considerando que la resistencia permanece constante.

Resultado: **a.** I = 13,6 A,
b. P = 968 W

4.4. En las instalaciones eléctricas de viviendas, junto al cuadro de mando y protección, e inmediatamente antes, se sitúa el "Interruptor de control de potencia (ICP)". Este es un interruptor automático que determina la potencia simultánea disponible, de acuerdo con el contrato de suministro de energía eléctrica. Este interruptor desconecta la instalación, "dispara" cuando la suma de las potencias de los aparatos conectados a la vez sobrepasa la potencia contratada. ¿De qué calibre (intensidad a la que dispara) será el interruptor de control de potencia, si la potencia contratada es de 3.300 W a la tensión de 220 V?

Resultado: 15 A

4.5. ¿Cómo fabricarse una estufa? En el mercado existen hilos metálicos con un coeficiente de resistividad bastante alto. Por ejemplo, el ferroníquel tiene un coeficiente de resistividad de 0,8 Ω. mm^2/m. Si nosotros enrollamos hilo de este material sobre un soporte aislante (a ser posible un material refractario), y hacemos pasar una corriente por él, éste se calentará intensamente.

El proyecto de fabricación de la estufa podría ser el siguiente: se quiere construir una estufa eléctrica de 500 W de potencia para conectar una red de 125 V de tensión. Para ello, se dispone de hilo de ferroníquel de 0,5 mm^2 de sección. Determinar la longitud del hilo que será necesario enrollar sobre el soporte aislante.

Resultado: 19,5 m

4.6. Calcular la potencia que perderá una línea eléctrica de 50 m de longitud compuesta por dos conductores de aluminio de 1,5 mm^2 de sección y que alimenta un motor eléctrico de 1 KW a 125 V.

Resultado: 119 W

4.7. La placa de una cocina eléctrica indica que consume una potencia de 2,5 KW a la tensión de 220 V. Calcular: **a.** la intensidad, **b.** el valor de la resistencia, **c.** la energía eléctrica que consumirá (en KWh) en un mes, si funciona durante 2 horas al día.

Resultado: **a.** 11,36 A;
b. 19,36 Ω;
c. 150 KWh

4.8. Para elevar agua de un pozo se instala una motobomba movida por un motor eléctrico de 3 CV a una red de 380 V. Teniendo en cuenta que 1 CV equivale

aproximadamente a 736 W, calcular: **a.** la intensidad de corriente; **b.** el gasto bimensual si el motor, funciona por término medio, 8 h al día. Precio del KWh: 16 ptas.

Resultado: **a.** 5,8 A;
b. 16.934 ptas.

4.9. Consigue un recibo de la luz de tu vivienda e investiga los diferentes términos que en él se contemplan.

4.10. ¿Cómo es la resistencia de los circuitos medidores de un vatímetro?

a. ❑ La resistencia de la amperimétrica es baja, mientras que la de la voltimétrica es alta.

b. ❑ La resistencia de la amperimétrica es alta, mientras que la de la voltimétrica es baja.

c. ❑ Aproximadamente igual.

4.11. ¿Cómo se conecta el contador de energía?

a. ❑ En derivación con la carga.

b. ❑ El circuito voltimétrico en serie y el amperimétrico en paralelo.

c. ❑ Exactamente igual que un vatímetro.

5 Circuitos serie y paralelo

El montaje de receptores en serie y paralelo ocupa un lugar especial dentro de la electricidad. El cálculo de las magnitudes eléctricas que se dan en los circuitos, como tensión, intensidad resistencia y potencia, depende de la forma en que están acoplados los receptores.

Por lo general, en la industria y en las viviendas, los receptores se instalan en paralelo. No obstante, en muchas ocasiones aparecen partes de la instalación que quedan interconectadas en serie, por lo que es muy importante realizar también un estudio detallado de esta forma de conexión.

Acoplamiento de receptores en serie

Acoplar varios receptores en serie consiste en ir conectando el terminal de salida de uno con el de entrada del otro sucesivamente.

En el esquema de la Figura 5.1 se han representado tres resistencias (R_1, R_2, R_3) conectadas en serie. Al cerrar el interruptor, el conjunto de estas tres resistencias quedará sometido a la tensión *V* del generador, lo que hará que surja una corriente eléctrica *I*, que se establecerá por todas las resistencias por igual, provocando en cada una de ellas las tensiones V_{AB}, V_{BC} y V_{CD} respectivamente. De tal manera que la suma de dichas tensiones es igual a la aplicada al conjunto.

$$V = V_{AB} + V_{BC} + V_{CD}$$

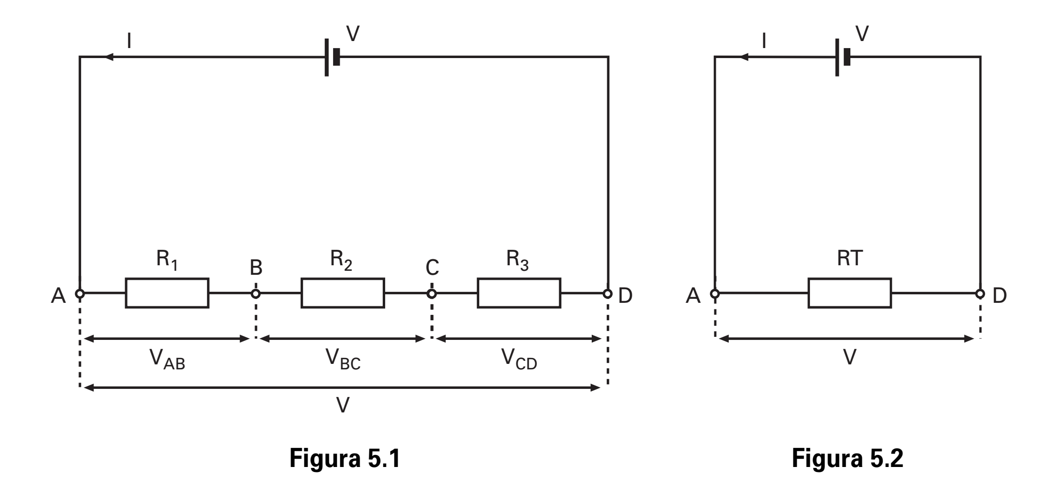


Figura 5.1 **Figura 5.2**

☞ ¿Por qué la intensidad que atraviesa todas las resistencias es la misma?

La corriente eléctrica es un flujo de electrones que, en este caso, se establece por el generador, el conductor, y las tres resistencias. Como los electrones no se quedan acumulados en ningún punto del circuito, los mismos que entran por el terminal de una resistencia, salen por otro terminal de la misma, para a continuación, entrar por el terminal de la siguiente resistencia y así sucesivamente.

☞ ¿Por qué se reparte la tensión entre las resistencias?

La tensión que aparece entre dos puntos de un circuito surge gracias a la diferencia de cargas que existe entre los mismos. Sabemos que esta diferencia de cargas es la que produce la fuerza que impulsa a moverse a los electrones de un punto a otro del circuito. En un circuito serie la fuerza que provoca la tensión del conjunto irá perdiendo su efecto al realizar sucesivos trabajos en los receptores conectados en serie y producirá, lo que se conoce como, caída de tensión en cada uno de los mismos. Lógicamente, cabe pensar que al ser igual la corriente para todos los receptores, necesitarán más fuerza de impulsión (más tensión) aquéllos que tengan mayor resistencia eléctrica.

☞ ¿Cómo se calculan estas caídas de tensión?

De la ley de Ohm tenemos que: $V = R \cdot I$

Nota importante: La ley de Ohm siempre se aplica entre dos puntos concretos del circuito. Así, por ejemplo, para determinar el valor de la tensión V_{AB}, habrá que aplicar esta ley entre los puntos A y B. Como entre estos puntos la resistencia es R_1 y la corriente I, tendremos que:

$$V_{AB} = R_1 \cdot I$$

Por la misma razón: $V_{BC} = R_2 \cdot I$

$$V_{CD} = R_3 \cdot I$$

Por otro lado, como $V = V_{AB} + V_{BC} + V_{CD}$ y sustituyendo los valores de V_{AB}, V_{BC}, y V_{CD} en esta ecuación, nos queda la siguiente expresión:

$V = R_1 \cdot I + R_2 \cdot I + R_3 \cdot I$ operando: $V = (R_1 + R_2 + R_3) \cdot I$

despejando I: $I = \dfrac{V}{R_1 + R_2 + R_3}$ **(I)**

Esta expresión nos dice que para calcular la intensidad que se establece en un circuito de resistencias en serie, basta con dividir la tensión total aplicada al circuito entre la suma de resistencias conectadas en serie.

- **Resistencia total o equivalente (R_T)**: se denomina así a la resistencia que produce los mismos efectos que todo el conjunto de resistencias (Figura 5.2).

  En el circuito equivalente se cumple la ley de Ohm teniendo en cuenta toda la tensión y toda la resistencia:

  Luego: $I = \dfrac{V}{R_T}$ **(II)**

  Si comparamos la expresión (I) y la (II) podemos deducir que la resistencia total o equivalente es igual a la suma de las resistencias de cada uno de los receptores:

  $$R_T = R_1 + R_2 + R_3$$

- **Potencia eléctrica de cada receptor**: Se aplica la expresión general de potencia eléctrica $P = V \cdot I$, teniendo en cuenta que, al igual que hicimos al aplicar la ley de Ohm, siempre se hace sobre los dos puntos concretos del circuito donde queremos calcular la potencia. De esta forma, tenemos que :

  $P_1 = V_{AB} \cdot I$ $P_2 = V_{BC} \cdot I$ $P_3 = V_{CD} \cdot I$

  La potencia total la calculamos sumando cada una de las potencias parciales:

  $$P_T = P_1 + P_2 + P_3$$

  O empleando la expresión de potencia y aplicando la tensión total aplicada:

  $$P_T = V \cdot I$$

Ejemplos

5.1 Se conectan a una batería de acumuladores de 24 V dos resistencias en serie de 20 Ω, 10 Ω, respectivamente (Figura 5.3). Se quiere determinar: **a.** La intensidad que recorre el circuito, **b.** Tensión a la que queda sometida cada resistencia, **c.** Potencia de cada una de las resistencias, **d.** Potencia total del circuito.

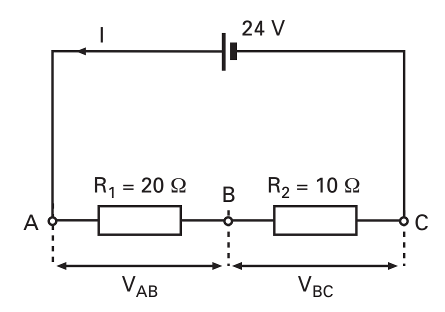


Figura 5.3

Solución:

Primero, calculamos la resistencia total: $R_T = R_1 + R_2 = \ldots\ldots = 30\ \Omega$

La intensidad será entonces: $I = \dfrac{V}{R_T} = \ldots\ldots = 0{,}8\ \text{A}$

La tensión a que queda sometida cada resistencia es: $V_{AB} = R_1 \cdot I = \ldots\ldots = 16\ \text{V}$

$V_{BC} = \ldots\ldots = \ldots\ldots = 8\ \text{V}$

Comprueba la igualdad: $V = V_{AB} + V_{BC} = \ldots\ldots = 24\ \text{V}$

La potencia de cada resistencia es: $P_1 = V_{AB} \cdot I = \ldots\ldots = 12{,}8\ \text{W}$

$P_2 = \ldots\ldots = \ldots\ldots = 6{,}4\ \text{W}$

La potencia total es: $P_T = V \cdot I = 24 \cdot 0{,}8 = 19{,}2\ \text{W}$

Comprueba la igualdad: $P_T = P_1 + P_2 = \ldots\ldots = 19{,}2\ \text{W}$

5.2 Se desea aprovechar unas lámparas de 110 V/40 W para conectarlas a una red de 220 V. ¿Cuántas lámparas será necesario montar en serie? ¿Qué intensidad recorrerá el circuito? ¿Cuál será la potencia total consumida por el conjunto de lámparas? ¿Cuál será la resistencia de cada lámpara y la equivalente al conjunto de las mismas?

Solución: Como todas las lámparas son iguales y de la misma tensión, el número que hay que conectar en serie será (Figura 5.4):

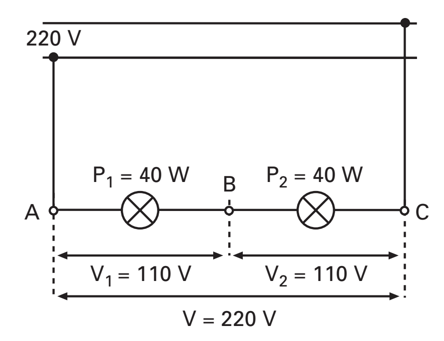


Figura 5.4

$$\frac{220\ \text{V}}{110\ \text{V}} = 2 \text{ lámparas}$$

La potencia total será: $P_T = 2 \cdot 40 = 80\ \text{W}$

La intensidad la podemos calcular así: $P_T = V \cdot I$

despejando: $I = \dfrac{P_T}{V} = \dfrac{80}{220} = 0{,}36\ \text{A}$

Como todas las lámparas son iguales, sus resistencias también lo serán.

$$R_1 = \frac{V}{I} = \frac{110}{0{,}36} = 305\ \Omega \qquad R_T = 305 + 305 = 610\ \Omega$$

5.3 Para que una lámpara incandescente de 125 V/40 W no se funda al conectarla a una red de 220 V se le conecta una resistencia en serie. Calcular el valor óhmico de esta resistencia, así como su potencia de trabajo.

Solución: Lo más importante para resolver este tipo de problemas es dibujar un esquema eléctrico donde se puedan ver las diferentes magnitudes del circuito eléctrico (Figura 5.5).

Se puede deducir fácilmente que la tensión a que debe quedar la resistencia es

$$V_{AB} = 220 - 125 = 95\ \text{V}$$

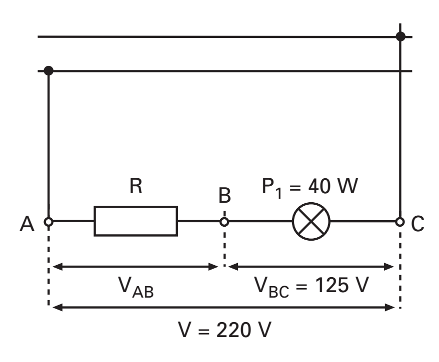


Figura 5.5

Aplicando la expresión de la potencia entre los bornes de la lámpara (puntos BC) determinamos la intensidad del circuito:

$$I = \frac{P_L}{V_{BC}} = \frac{40}{125} = 0,32 \text{ A}$$

Si aplicamos ahora la ley de Ohm entre los extremos de la resistencia (puntos AB) calculamos su valor óhmico.

$$R = \frac{V_{AB}}{I} = \frac{95}{0,32} = 297 \ \Omega$$

La potencia de esta resistencia es $P = V_{AB} \cdot I = 95 \cdot 0,32 = 30 \text{ W}$

Es importante tener en cuenta este último dato, ya que nos indica que a la vez que la resistencia provoca una caída de tensión de 95 V, lo hace a costa de producir un consumo de 30 W, que se disipa en forma de calor como una potencia perdida.

Aplicaciones prácticas del acoplamiento en serie

En algunas instalaciones de iluminación, como por ejemplo las luces de un árbol de navidad, se conectan las lámparas en serie. El principal inconveniente que se presenta es que cuando se funde una lámpara el circuito se interrumpe y, por tanto, dejan de lucir todas las demás.

Otra aplicación consiste en la construcción de "*reostatos*". Estos son resistencias variables que al ser acopladas en serie con un receptor, provocan una caída de tensión que se modifica al variar la resistencia del reostato, consiguiendo así regular la intensidad, tensión y potencia de dicho receptor (Figura 5.6).

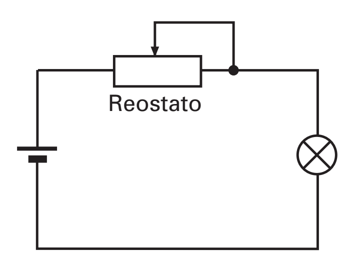


Figura 5.6

Ejemplos

5.4 Para regular la intensidad que recorre un receptor eléctrico de 10 ohmios de resistencia se conecta en serie con él un reostato. Determinar los valores óhmicos que habrá de tener dicho reostato para conseguir que la intensidad de corriente esté entre 1 y 10 A al aplicar al conjunto una tensión de 220 V.

Solución: Calcularemos primero la resistencia total del circuito serie formado por el resistencia R del receptor y R_r del reostato para que la corriente sea de 1 A al aplicar 220 V:

$$I = \frac{V}{R_T} \quad \text{despejando} \quad R_T = \frac{V}{I} = \frac{220}{1} = 220\ \Omega$$

Como $R_T = R + R_r$, despejando $R_r = R_T - R = 220 - 10 = 210\ \Omega$

Para la corriente de 10 A tendremos que:

$$R_T = \frac{220}{10} = 22\ \Omega \qquad R_r = 22 - 10 = 12\ \Omega$$

Por lo que el reostato deberá regular su resistencia entre 12 y 210 Ω.

La tensión y potencia que se dan en el receptor R entre estos dos valores será:

a. Para $I = 1 \cdot A$: $V_R = R \cdot I = 10 \cdot 1 = 10\ V$

$$P_R = V_R \cdot I = 10 \cdot 1 = 10\ W$$

b. Para $I = 10 \cdot A$: $V_R = R \cdot I = 10 \cdot 10 = 100\ V$

$$P_R = V_R \cdot I = 100 \cdot 10 = 1.000\ W$$

Por otro lado, al pasar corriente por el reostato éste produce una potencia P_r, que se pierde en forma de calor, y que será:

a. Para $I = 1 \cdot A$: $P_r = R_r \cdot I^2 = 210 \cdot 1^2 = 210\ W$

b. Para $I = 10 \cdot A$: $P_r = R_r \cdot I^2 = 12 \cdot 10^2 = 1.200\ W$

De este ejemplo se puede deducir que el reostato no es muy buena solución para regular corrientes de carga considerables, dado la elevada potencia perdida que se desarrolla en los mismos. En la práctica, hoy en día sólo se emplean reostatos o resistencias variables en aquellos circuitos en que las corrientes son muy pequeñas (del orden de algunos miliamperios), como es el caso de los potenciómetros, resistencias ajustables, etc, en aplicaciones de circuitos electrónicos. Las nuevas tecnologías han encontrado medios más eficaces de regulación a base de semiconductores.

Acoplamiento de receptores en paralelo

Acoplar varios receptores en paralelo (o derivación) es conectar los terminales de dichos terminales entre sí, tal como se muestra en la figura 5.7.

En el esquema de la figura 5.7 las resistencias están conectadas a los mismos puntos A y B. El montaje de receptores en paralelo se caracteriza porque todos ellos están sometidos a la misma tensión.

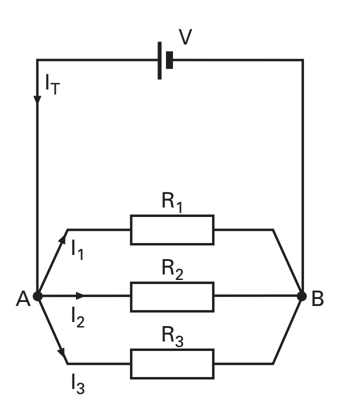


Figura 5.7

El generador suministra una corriente I_T que se reparte por cada una de las resistencias. I_1 por R_1, I_2 por R_2 e I_3 por R_3. Cumpliéndose que la corriente suministrada al circuito (I_T) es igual a la suma de corrientes (I_1, I_2, I_3) que fluyen por cada uno de los receptores conectados en paralelo.

$$I_T = I_1 + I_2 + I_3$$

La razón de que se cumpla esta expresión es debido a que los electrones que entran en el nudo (A) no quedan acumulados en él, por lo que toda la intensidad I_T que entra al nudo tiene que salir, también de él.

Para calcular las intensidades I_1, I_2 e I_3 basta con aplicar la ley de Ohm entre los puntos A y B y en cada una de las resistencias correspondientes.

$$I_1 = \frac{V}{R_1} \qquad I_2 = \frac{V}{R_2} \qquad I_3 = \frac{V}{R_3}$$

☞ ¿Cómo se determina la resistencia total o equivalente?

Sabemos que $I_T = I_1 + I_2 + I_3$ sustituyendo en esta expresión los valores de las intensidades parciales por su igualdad, tenemos que:

$$I_T = \frac{V}{R_1} + \frac{V}{R_2} + \frac{V}{R_3} \text{ y sacando factor común a V: } I_T = V \cdot \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) \textbf{ (I)}$$

Por otro lado, sabemos que para calcular la corriente eléctrica que suministra el generador al conjunto del circuito, tendremos que tener en cuenta la resistencia equivalente (R_T), que es la que produce los mismos efectos que todas las resistencias acopladas en paralelo.

$I_T = \frac{V}{R_T}$ **(II)**, si ahora comparamos las expresiones **I** y **II**, podemos llegar a la siguiente igualdad:

$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \quad \text{y despejando:} \quad R_T = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}}$$

Para un número **n** de resistencias la expresión quedaría así:

$$R_T = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \ldots + \frac{1}{R_n}}$$

Para calcular las potencias se opera como ya conocemos:

$$P_1 = V \cdot I_1 \quad P_2 = V \cdot I_2 \quad P_3 = V \cdot I_3 \quad P_T = V \cdot I_T \quad \text{o} \quad P_T = P_1 + P_2 + P_3$$

Ejemplos

5.5 A una pila de 9 voltios se le conectan dos resistencias en paralelo de 6 y 2 Ω, respectivamente. Calcular: **a.** la resistencia total, **b.** la intensidad de cada resistencia y del conjunto, **c.** la potencia de cada una, así como la total cedida por la pila (Figura 5.8).

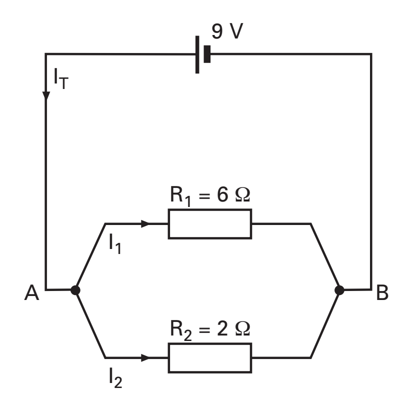


Figura 5.8

Solución a: $R_T = \dfrac{1}{\dfrac{1}{R_1}+\dfrac{1}{R_2}} = \dfrac{1}{\dfrac{1}{6}+\dfrac{1}{2}} = \dfrac{1}{\dfrac{1+3}{6}} = \dfrac{6}{4} = 1,5\ \Omega$

Nota: Para sumar las fracciones 1/6 + 1/2 se las ha reducido al mismo denominador.

Es importante señalar, que la resistencia total o equivalente da como resultado un valor inferior a la más pequeña de las resistencias conectadas en paralelo. Este resultado es el esperado, ya que contra más circuitos derivados existan, habrá también más caminos por donde pueda pasar la corriente eléctrica y, por tanto, menos dificultad para el establecimiento de la intensidad total.

solución b: $I_1 = \dfrac{V}{R_1} = \dfrac{9}{6} = 1,5\ \text{A}$ $\quad I_2 = \dfrac{V}{R_2} = \dfrac{9}{2} = 4,5\ \text{A}$ $\quad I_T = \dfrac{V}{R_T} = \dfrac{9}{1,5} = 6\ \text{A}$

Comprueba si el resultado obtenido al calcular la intensidad total es el mismo que sumando las intensidades:

$$I_T = I_1 + I_2 = \ldots + \ldots = 6\ \text{A}$$

solución c: $P_1 = V \cdot I_1 = 9 \cdot 1,5 = 13,5\ \text{W}$

$$P_2 = \ldots = \ldots = 40,5\ \text{W}$$

$$P_T = V \cdot I_T = 9 \cdot 6 = 54\ \text{W}$$

Comprueba si se obtiene el mismo resultado empleando la expresión:

$$P_T = P_1 + P_2 = \ldots + \ldots = 54\ \text{W}$$

5.6 Una línea eléctrica de 220 V alimenta a los siguientes receptores: una lámpara incandescente de 60 W, una cocina eléctrica de 3 KW y una estufa de 1 KW (Figura 5.9). Calcular: **a.** la intensidad que absorbe cada receptor de la red, **b.** Resistencia de cada receptor, **c.** Resistencia total.

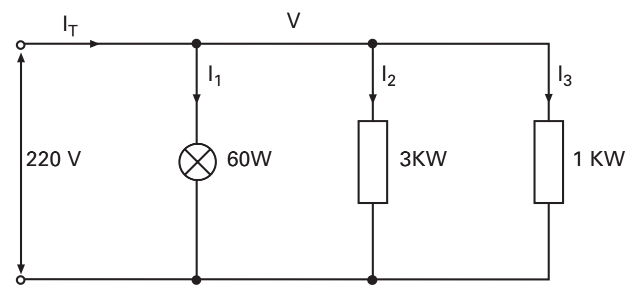


Figura 5.9

solución a: Como todos los receptores están sometidos a la misma tensión se trata de un montaje en paralelo.

Como conocemos la potencia de cada receptor y la tensión a la que están sometidos, bien fácil es calcular la intensidad de cada uno.

$$I_1 = \frac{P_1}{V} = \frac{60}{220} = 0,27\ \text{A} \qquad I_2 = \frac{P_2}{V} = \ldots\ldots = 13,64\ \text{A}$$

$$I_3 = \ldots\ldots = \ldots\ldots = 4,55\ \text{A}$$

La intensidad total la calculamos sumando estas intensidades.

$$I_T = I_1 + I_2 + I_3 = 0,27 + \ldots + \ldots = 18,46\ \text{A}$$

solución b: Las resistencias de cada uno de los receptores las calculamos aplicando la ley de Ohm en los extremos de cada uno de los mismos:

$$R_1 = \frac{V}{I_1} = \frac{220}{0,27} = 814,8\ \Omega \qquad R_2 = \frac{V}{I_2} = \ldots\ldots = 16,1\ \Omega$$

$$R_3 = \ldots\ldots = \ldots\ldots = 48,4\ \Omega$$

Como ya conocemos la intensidad total, para calcular la resistencia total o equivalente nos valdremos de la expresión:

$$R_T = \frac{V}{I_T} = \frac{220}{18,46} = 11,9\ \Omega$$

Comprueba el resultado aplicando la expresión: $R_T = \dfrac{1}{\dfrac{1}{R_1} + \dfrac{1}{R_2} + \dfrac{1}{R_3}}$

Resúmen de Conceptos

Acoplar varios receptores en serie consiste en ir conectando el terminal de salida de uno con el de entrada del otro, sucesivamente.

Acoplar varios receptores en paralelo (o derivación) es conectar ambos terminales entre sí.

CIRCUITOS SERIE	CIRCUITOS PARALELO
$V = V_1 + V_2 + V_3 + \ldots V_n$	$I_T = I_1 + I_2 + I_3 + \ldots I_n$
$V_1 = R_1 \cdot I$ $V_2 = R_2 \cdot I$ $V_3 = R_3 \cdot I$	$I_1 = V / R_1$ $I_2 = V / R_2$ $I_3 = V / R_3$
La corriente es igual para todos los receptores.	La tensión es igual para todos los receptores.
$R_T = R_1 + R_2 + R_3 + \ldots R_n$	$R_T = \dfrac{1}{\dfrac{1}{R_1} + \dfrac{1}{R_2} + \dfrac{1}{R_3} + \ldots \dfrac{1}{R_n}}$
$P_1 = V_1 \cdot I$ $P_2 = V_2 \cdot I$ $P_3 = V_3 \cdot I$	$P_1 = V \cdot I_1$ $P_2 = V \cdot I_2$ $P_3 = V \cdot I_3$
$P_T = P_1 + P_2 + P_3 + \ldots P_n$	$P_T = P_1 + P_2 + P_3 + \ldots P_n$

Actividades

5.1. Se conectan en serie tres resistencias de 200 Ω, 140 Ω, y 100 Ω a una red de 220 V. Determinar la intensidad, tensiones y potencias de cada una, así como la potencia y resistencia total.

Resultado: I = 0,5 A, V_1 = 100 V, V_2 = 70 V, V_3 =50 V, P_1 = 50 W, P_2 = 35 W, P_3 = 25 W, P_T = 110 W, R_T = 440 Ω

5.2. Se conectan tres resistencias en serie de 10 Ω, 5 Ω y 6 Ω a una fuente de alimentación. La caída de tensión en la resistencia de 5 Ω es de 5 V. ¿Cuál es la tensión de la fuente de alimentación?

Resultado: 21 V

5.3. La bobina de un electroimán está compuesta por 150 metros de hilo de cobre esmaltado de 1 mm de diámetro. Determinar el valor óhmico de la resistencia que habrá que conectar en serie para que la intensidad de corriente sea de 350 mA cuando se aplique una tensión continua de 12 V.

Resultado: 31 Ω

5.4. Se conectan en serie a una red de 220 V dos calefactores eléctricos de características nº1: 500 W / 220 V, nº2: 750 W / 220 V. Determinar la resistencia total y de cada uno, la corriente por el circuito, así como la tensión y potencia de funcionamiento de cada uno de ellos.

Resultado: nº1 (96,8 Ω; 132 V; 180 W),
nº2 (64,5 Ω; 88 V; 120 W),
Total (161,3 Ω; 1,36 A, 300 W).

5.5. Calcular las características que debe tener la resistencia que hay que conectar en serie a un receptor resistivo de características 9 V/10 W para poder conectarlo a una batería de 24 V sin que sufra daños.

Resultado: 13, 5 Ω; 16,7 W

5.6. Se conectan tres lámparas en paralelo de resistencias 6, 4 y 12 Ω a una batería de automóvil de 12 V. Calcular: **a.** la resistencia y potencia total, **b.** corrientes parciales y total**.**

Resultado: R_T = 2 Ω; I_1 = 2 A; I_2 = 3 A; I_3 = 1 A; I_T = 6 A; P_1 = 24 W;
P_2 = 36 W; P_3 = 12 W; P_T = 72 W

5.7. Una instalación consta de cuatro lámparas, de potencias 25, 40, 60, y 100 W respectivamente, conectadas en paralelo y alimentadas a 220 V. Determinar la resistencia total y la intensidad total del circuito.

Resultado: 215 Ω; 1,02 A

5.8. Dos resistencias en paralelo dan como resultado 3 ohmios. Determinar una sabiendo que la otra vale 12 ohmios.

Resultado: 4 Ω

Nota: Este ejercicio se puede resolver aplicando la expresión particular para el caso de sólo dos resistencias conectadas en paralelo.

$$R_T = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

5.9. Se conectan 20 resistencias de 1 KΩ cada una en paralelo a una fuente de alimentación de 500 voltios. Averiguar: **a.** resistencia equivalente, **b.** intensidad por cada resistencia e intensidad total, **c.** potencia de cada resistencia y potencia total.

Resultado: **a.** $R_T = 50\ \Omega$;
b. $I = 500$ mA; $I_T = 10$ A;
c. $P = 250$ W; $P_T = 5000$ W

Nota: Este ejercicio se puede resolver aplicando la expresión particular para el caso de un número ***n*** de resistencias iguales de valor *R* conectadas en paralelo:

$$R_T = \frac{R}{n}$$

5.10. En un circuito serie:

a. ❑ La resistencia equivalente es igual a la suma de las resistencias conectadas en serie.

b. ❑ La intensidad es igual para todos los receptores.

c. ❑ La tensión es igual para todos los receptores.

5.11. En un circuito paralelo:

a. ❑ La resistencia equivalente siempre es inferior a la de cualquier resistencia conectada en paralelo.

b. ❑ La intensidad es igual para todos los receptores.

c. ❑ La tensión es igual para todos los receptores.

6 Circuitos mixtos Leyes de Kirchhoff

Circuitos mixtos

Al igual que es posible conectar receptores en serie o en paralelo, en ocasiones pueden aparecer circuitos con receptores acoplados en serie mezclados con receptores acoplados en paralelo. Estos circuitos son los denominados mixtos. En la figura 6.1 se muestra un ejemplo de ellos. Aquí las resistencias R_2 y R_3 están claramente conectadas en paralelo entre sí y, a su vez, su resistencia equivalente se conecta en serie con R_1.

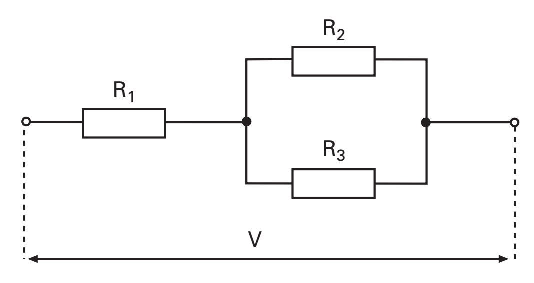


Figura 6.1

Para resolver este tipo de ejercicios hay que seguir los siguientes pasos:

a. Reducir a su circuito equivalente aquellas partes del circuito que estén claramente acopladas, bien en serie o en paralelo.

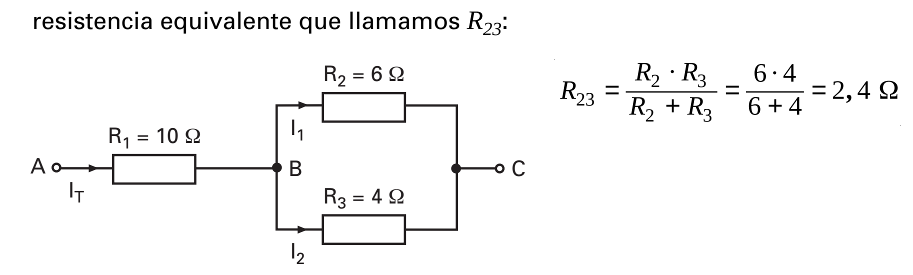
b. Dibujar sucesivamente los nuevos circuitos equivalentes obtenidos, indicando las magnitudes conocidas y desconocidas.

c. Calcular las magnitudes desconocidas del circuito desde los circuitos equivalentes más reducidos hasta el circuito original.

Ejemplos

6.1 Determinar las tensiones, potencias e intensidades de cada una de las resistencias del circuito mixto de la Figura 6.2 si aplicamos entre los extremos AC del circuito una tensión de 24,8 V.

Como R_3 y R_2 están claramente conectadas en paralelo determinamos su resistencia equivalente que llamamos R_{23}:



$$R_{23} = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3} = \frac{6 \cdot 4}{6+4} = 2,4\ \Omega$$

Figura 6.2

Ahora dibujamos el circuito equivalente al anterior en el que se ha sustituido R_2 y R_3 por R_{23} (Figura 6.3). Observa que R_1 y R_{23} están conectados en serie.

A R1 = 10 Ω B R23 = 2,4 Ω C

$$R_T = R_1 + R_{23} = 10 + 2,4 = 12,4\ \Omega$$

Figura 6.3

Una vez reducidas todas las resistencias a su equivalente R_T, dibujamos el circuito final de la Figura 6.4 y calculamos con él la intensidad total del circuito.

A RT = 12,4 Ω C IT

$$I_T = \frac{V}{R_T} = \frac{24,8}{12,4} = 2\ \text{A}$$

Figura 6.4

Aplicando la ley de Ohm en el circuito equivalente de la Figura 6.3 obtenemos las tensiones V_{AB} y V_{BC} :

$$V_{AB} = R_1 \cdot I_T = 10 \cdot 2 = 20\ \text{V}$$

$$V_{BC} = R_{23} \cdot I_T = 2,4 \cdot 2 = 4,8\ \text{V}$$

Una vez obtenidas estas tensiones, podemos calcular las intensidades I_1 e I_2 aplicando la ley de Ohm en el circuito original de la figura 6.2.

$$I_1 = \frac{V_{BC}}{R_2} = \frac{4,8}{6} = 0,8\ \text{A} \qquad I_2 = \frac{V_{BC}}{R_3} = \frac{4,8}{4} = 1,2\ \text{A}$$

Por último indicamos la tensión, intensidad y potencia que le corresponde a cada una de las resistencias: $P = V \cdot I$

R_1: (20 V); (2 A); $P_1 = 20 \cdot 2 = 40$ W

R_2: (4,8 V); (0,8 A); $P_2 = 4,8 \cdot 0,8 = 3,84$ W

R_3: (4,8 V); (1,2 A); $P_3 = 4,8 \cdot 1,2 = 5,76$ W

R_T: (24,8 V); (2 A); $P_T = 24,8 \cdot 2 = 49,6$ W

Leyes de Kirchhoff

Estas leyes se utilizan para resolver circuitos eléctricos complejos en los cuales existen interconectados varios generadores y receptores.

En el siguiente ejemplo se muestra un circuito de este tipo:

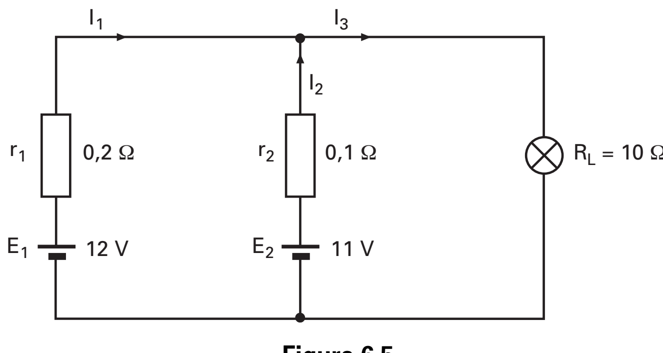


Figura 6.5

En el circuito de la Figura 6.5 se han conectado en paralelo dos baterías de acumuladores que suministran energía a una lámpara de 10 ohmios. La batería nº1 produce una f.e.m. E_1 = 12 V con una resistencia interna r_1 = 0,2 Ω. En la batería nº2, E_2 = 11 V, r_2 = 0,1 Ω. Calcular la tensión que aparece en bornes de la lámpara, así como la intensidad y potencia de la misma. ¿Qué corriente cede cada una de las baterías?

1ª ley de Kirchhoff

En cierta modo, esta ley ya la hemos estado aplicando para la resolución de los circuitos en paralelo. Dice así:

☞ *En todo circuito eléctrico, la suma de las corrientes que se dirigen hacia un nudo es igual a la suma de las intensidades que se alejan de él.*

Un nudo es cualquier punto de un circuito donde se conectan más de dos conductores. En el ejemplo mostrado en la figura 6.5 existen el nudo A y el nudo B:

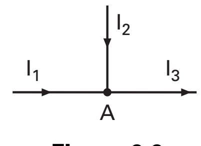


Figura 6.6

En el nudo A se cumplirá que (Figura 6.6): $I_3 = I_1 + I_2$

2ª ley de Kirchhoff

Esta otra ley también es conocida por todos nosotros, ya que la hemos aplicado en la resolución de circuitos en serie.

En un circuito cerrado la suma algebraica de las fuerzas electromotrices es igual a la suma algebraica de las caídas de tensión en las resistencias. Dado que tanto las f.e.m. como las caídas de tensión son al fin y al cabo diferencias de potencial, también se podría enunciar esta ley así:

☞ *A lo largo de todo camino cerrado o malla, correspondiente a un circuito eléctrico, la suma algebraica de todas las diferencias de potencial es igual a cero.*

La única dificultad que encontramos para aplicar de esta última manera la 2ª ley de kirchhoff es determinar qué diferencias de potencial son positivas respecto a las otras y así conseguir igualarlas a cero.

Una **malla** es todo camino cerrado de un circuito eléctrico. En nuestro ejemplo se pueden apreciar claramente la malla M_1 y la malla M_2. Las hemos representado en el circuito mediante una flecha curvada que nos indica el recorrido de las mismas (Figura 6.8). La malla M_1 se cierra por la batería de 12 V junto con su resistencia interna de 0,2 ohmios, continua por la resistencia interna de 0,1 ohmios de la segunda batería para acabar cerrando el circuito por la batería de 11 V. La malla M_2 lo hace por la batería de 11 V y su correspondiente resistencia interna de 0,1 ohmios y se cierra por la resistencia de 10 ohmios de la lámpara.

Antes de aplicar esta segunda ley, conviene establecer una regla de signos que nos indique las polaridades correctas de cada una de las d.d.p. que aparecen en cada malla.

Marcamos con una flecha la f.e.m. del generador (la punta de la flecha siempre nos indica el potencial positivo). La intensidad que parte del generador la indicamos con

una flecha (sentido convencional de la corriente) del mismo sentido que la f.e.m. (Figura 6.7).

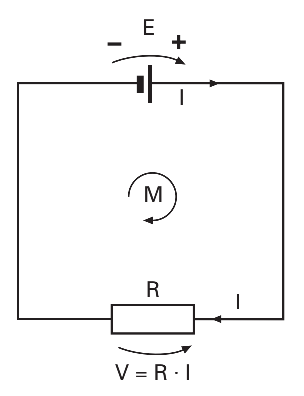


Figura 6.7

Marcamos con otra flecha la caída de tensión en el receptor ($V = R \cdot I$); su sentido será siempre contrario al de la intensidad que recorre el mismo.

Si ahora aplicamos la 2ª ley de Kirchhoff a la malla formada, según el sentido marcado en la figura 6.7, tendremos que: la fuerza electromotriz E se manifiesta en el mismo sentido que la malla, luego será positiva; la caída de tensión $R \cdot I$ se manifiesta en sentido contrario al de la malla, luego será negativa. De esta forma tendremos la siguiente ecuación:

$E - R \cdot I = 0$ ecuación que nos indica que efectivamente $E = R \cdot I$

☞ ¿Cómo se aplican las leyes de Kirchhoff para la resolución de circuitos?

a. Se fijan provisionalmente el sentido de las intensidades de corriente por el circuito (una vez resuelto el sistema de ecuaciones planteado, conoceremos el verdadero sentido de las mismas).

b. La aplicación de la segunda ley requiere fijar previamente y de forma arbitraria, un sentido para recorrer cada una de las mallas. Las f.e.m. y las caídas de tensión se consideran positivas si la flecha que indica su sentido coincide con el marcado por nosotros en la malla, y negativa en el caso contrario.

c. Se aplicará la 1ª ley a todos los nudos del circuito excepto a uno (esto se hace para no escribir ecuaciones repetidas).

d. Se aplica la 2ª ley a tantas mallas o circuitos cerrados como sea necesario para disponer de un sistema de tantas ecuaciones como incógnitas.

Ejemplos

6.2 Resolveremos ahora el ejemplo presentado al inicio en la Figura 6.4.

En un principio, se ha supuesto que las intensidades I_1 e I_2 parten de los generadores hacia la lámpara (según el sentido convencional) donde se juntan y forman I_3. Los términos $0{,}2 \cdot I_1$ y $0{,}1 \cdot I_2$ corresponden a las caídas de tensión de los respectivos generadores ($v = r_i \cdot I$). El término $10 \cdot I_3$ corresponde a la tensión en bornes de la lámpara ($V_L = R \cdot I$) (Figura 6.8).

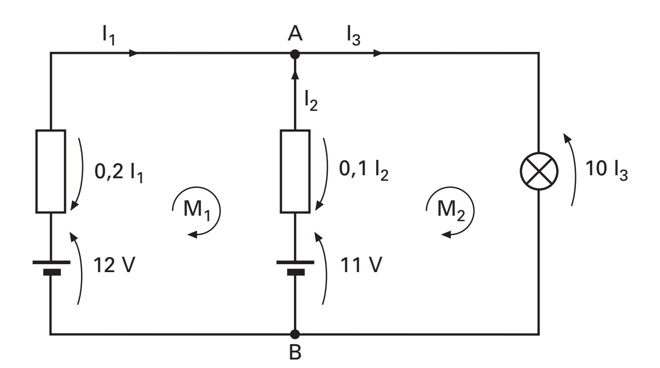


Figura 6.8

Nudo A (**1**) $I_1 + I_2 = I_3$

Malla M_1 (**2**) $12 - 0{,}2 \cdot I_1 + 0{,}1 \cdot I_2 - 11 = 0$

Malla M_2 (**3**) $11 - 0{,}1 \cdot I_2 - 10 \cdot I_3 = 0$

Al recorrer la malla M_1, la caída de tensión $0{,}2 \cdot I_1$ y los 11 V del generador nº 2 quedan en sentido contrario a los 12 V del generador nº 1 y a la caída de tensión $0{,}1 \cdot I_2$.

Al recorrer la malla M_2, la caída de tensión $0{,}1 \cdot I_2$ y la tensión en bornes de la lámpara $10 \cdot I_3$ quedan en sentido contrario a los 11 V del generador nº 2.

Ahora sólo nos queda resolver el sistema de tres ecuaciones con tres incógnitas (I_1, I_2 *e* I_3). Para ello, nos valemos de cualquiera de los métodos conocidos: reducción, sustitución e igualación. En nuestro caso sustituiremos los términos de la ecuación (1) en la ecuación (3). De esta forma eliminamos una ecuación y una incógnita:

(**3**) $11 - 0{,}1 \cdot I_2 - 10\,(I_1 + I_2) = 0$ simplificando:

(**3**) $11 - 10 \cdot I_1 - 10{,}1 \cdot I_2 = 0$ y con la ecuación nº 2:

(**2**) $1 - 0{,}2 \cdot I_1 + 0{,}1 \cdot I_2 = 0$

Al multiplicar la ecuación (2) por 101 y sumar este resultado a la ecuación (3) se elimina I_2:

$$\begin{array}{ll} (\mathbf{3}) & 11 - 10 \cdot I_1 - 10{,}1 \cdot I_2 = 0 \\ (\mathbf{2}) & \underline{101 - 20{,}2 \cdot I_1 + 10{,}1 \cdot I_2 = 0} \\ & 112 - 30{,}2 \cdot I_1 = 0 \end{array}$$

de donde $I_1 = \dfrac{112}{30{,}2} = 3{,}71\ \text{A}$

Se sustituye este resultado en la ecuación (2) y se tiene,

$$1 - 0{,}2\ (3{,}71) + 0{,}1 \cdot I_2 = 0$$

$I_2 = \dfrac{0{,}2 \cdot 3{,}71 - 1}{0{,}1} = -2{,}58\ \text{A}$ y en la ecuación (1) obtenemos:

$$I_3 = 3{,}71 - 2{,}58 = 1{,}13\ \text{A}$$

Que la corriente I_2 haya salido negativa nos indica que la batería de acumuladores nº 2 no está aportando energía a la lámpara. Por el contrario, está tomando 2,58 A de la batería nº 1. En este caso, esta corriente sirve para cargar los acumuladores de la nº 2.

La batería nº 1 aporta 1,13 A a la lámpara y 2,58 A a la batería nº 2 que se comporta como si fuese un receptor (recuerda que cuando la corriente queda en sentido contrario al de la tensión, se trata de un receptor).

La tensión en bornes de la lámpara y su potencia es:

$$V_{AB} = R_L \cdot I_3 = 10 \cdot 1{,}13 = 11{,}3\ \text{V}$$
$$P_L = V_{AB} \cdot I_3 = 11{,}3 \cdot 1{,}13 = 12{,}8\ \text{W}$$

6.3 Se conectan en serie tres baterías de acumuladores, tal como se muestra en el circuito de la Figura 6.9, para alimentar un horno de 5 ohmios de resistencia. Determinar la tensión en bornes del horno, así como su tensión y potencia.

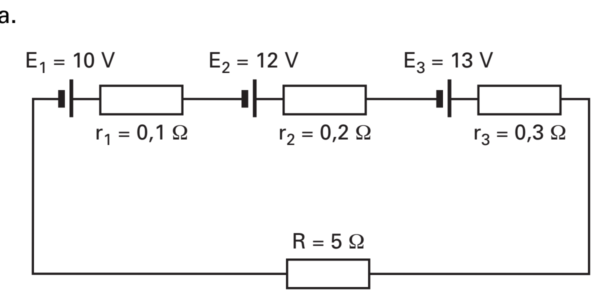


Figura 6.9

Solución: Primero marcamos el sentido de la corriente eléctrica y el de las diferentes d.d.p. del circuito (Figura 6.10). Como no hay más que una malla, la ecuación se compone aplicando la 2º ley de kirchhoff:

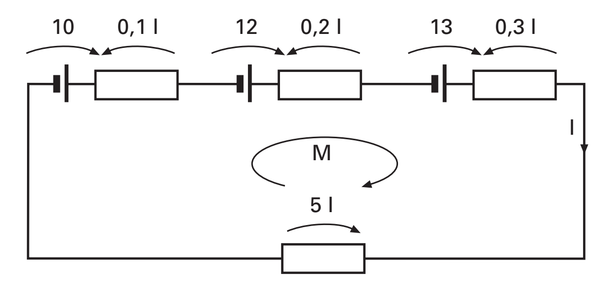


Figura 6.10

$$10 - 0{,}1 \cdot I + 12 - 0{,}2 \cdot I + 13 - 0{,}3 \cdot I - 5 \cdot I = 0$$

Agrupando términos $(10 + 12 + 13) - I\,(0{,}1 + 0{,}2 + 0{,}3 + 5) = 0$

y despejando, tenemos que: $I = \dfrac{35}{5{,}6} = 6{,}25\ \text{A}$

Tensión en bornes del horno: $V = R \cdot I = 5 \cdot 6{,}25 = 31{,}25\ \text{V}$

Potencia del horno: $P = V \cdot I = 31{,}25 \cdot 6{,}25 = 195\ \text{W}$

Resúmen de Conceptos

En los circuitos mixtos aparecen a la vez receptores acoplados en serie y paralelo.

1ª Ley de Kirchhoff: en todo circuito eléctrico, la suma de las corrientes que se dirigen hacia un nudo es igual a la suma de las intensidades que se alejan de él.

2ª ley de kirchhoff: a lo largo de todo camino cerrado o malla, correspondiente a un circuito eléctrico, la suma algebraica de todas las diferencias de potencial es igual a cero.

Actividades

6.1. Calcula la resistencia equivalente al circuito de la figura 6.11, así como la corriente y potencia que cedería una fuente de alimentación de 200 V conectada entre los extremos del mismo.

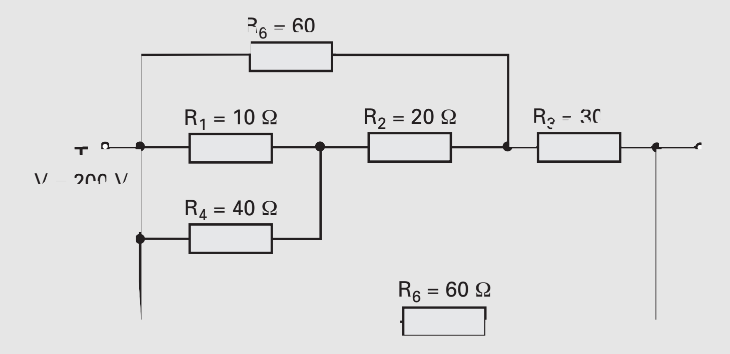


Figura 6.11

Resultado: R_T: (27 Ω, 7,5 A; 1501 W)

6.2. Calcula la tensión, intensidad y potencia de cada una de las resistencias, incluida la total, que aparecen en el circuito de la Figura 6.12.

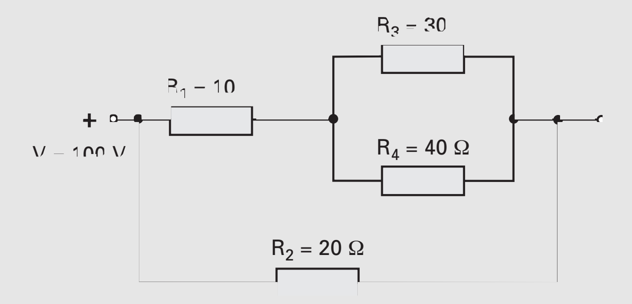


Figura 6.12

Resultado: a) R_1: (3,7 A; 37 V; 137 W) R_2: (5 A; 100 V; 500 W)
R_3: (2,1 A; 63 V; 132 W) R_4: (1,6 A; 63 V; 101 W)
R_T: (8,7 A; 100 V; 870 W)

6.3. Determinar las corrientes que fluyen por el circuito de la Figura 6.13.

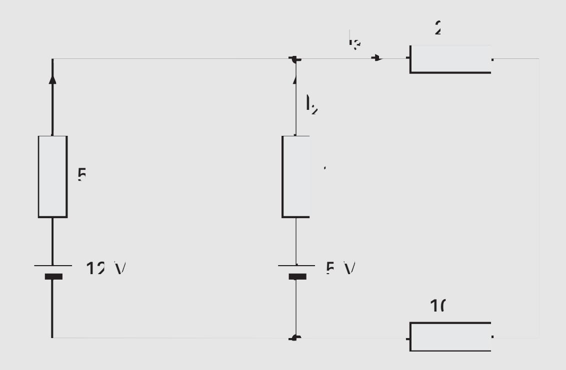


Figura 6.13

Resultado: I_1 = 1,25 A; I_2 = -0,75 A; I_3 = 0,5 A

6.4. Averiguar la tensión que aparece en la carga de 8 ohmios del circuito de la Figura 6.14.

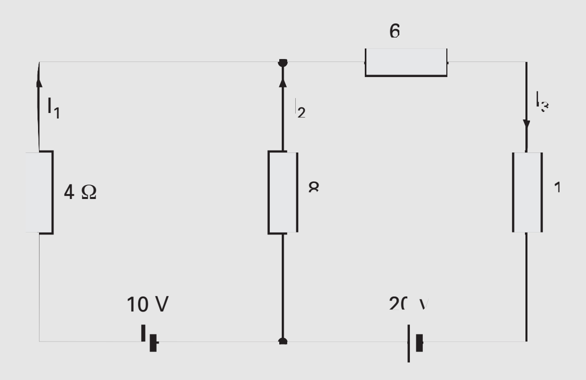


Figura 6.14

Resultado: 0,69 V

7 Conexión de Generadores

Al igual que con los receptores, los generadores pueden ser conectados en serie, paralelo o mixto. El resultado obtenido de estos agrupamientos es muy útil cuando se desea aumentar la tensión o la intensidad que suministra un generador.

Antes de estudiar el resultado de estas conexiones, vamos a estudiar algunas de las características típicas de un generador.

Resistencia interna de un generador

Todos los generadores de C.C. (baterías de acumuladores, pilas, dinamos, etc.) poseen una cierta resistencia interna (r_i). En el caso de pilas y acumuladores esta resistencia corresponde a la del electrólito y en el de las dinamos y alternadores a los conductores eléctricos con los que se construyen.

Tensión en bornes del generador

Cuando el generador suministra corriente al circuito exterior se produce una cierta caída de tensión en esta resistencia, de tal forma que la tensión que aparece en bornes del generador es menor que la f.e.m. del mismo (Figura 7.1):

$$V_b = E - r_i \cdot I$$

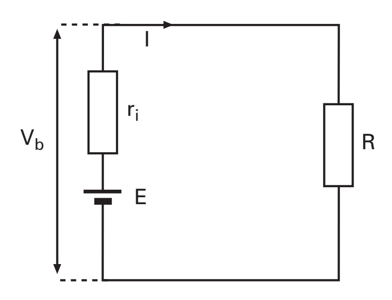


Figura 7.1

En estas condiciones, la tensión que suministra un generador irá disminuyendo según vaya aumentando la intensidad de la carga.

Potencia del generador

En la resistencia interna también se produce una pérdida de potencia, que se transforma en calor por efecto Joule y que reduce el rendimiento del generador.

Potencia perdida por el generador: $P_p = r_i \cdot I^2$

La potencia total que cede el generador al circuito será la suma de la potencia que se pierde en la resistencia interna más la que aparece en la carga. Para calcularla aplicamos la expresión de la potencia utilizando la fuerza electromotriz en el primer término (la f.e.m. se corresponde con toda la tensión que proporciona el generador) y la corriente en el segundo.

Potencia total cedida por el generador: $P_T = E \cdot I$ $\qquad P_T = P_u + P_p$

Al receptor se le entrega una potencia que es inferior a la total generada. Esta potencia útil es igual al producto de la tensión en bornes del generador por la corriente.

Potencia útil cedida a la carga: $P_u = V_b \cdot I$

Rendimiento eléctrico de un generador

Es la relación que existe entre la potencia útil que suministra el generador al circuito y la potencia total que éste desarrolla. Se representa por la letra griega η. Si expresamos el rendimiento porcentualmente tendremos que:

$$\eta_{eléctrico} = \frac{P_u}{P_T} \cdot 100$$

Ejemplos

7.1 Una batería de acumuladores de automóvil posee una f.e.m. de 12 V y una resistencia interna de 0,2 Ω. Determinar la tensión que aparecerá en bornes de la misma cuando se le conecte a una carga resistiva de 3 Ω. Hacer un balance de las potencias entregadas por el generador y determinar el rendimiento eléctrico.

Solución: Para calcular la intensidad tenemos en cuenta que a la resistencia de la carga se le suma la interna del propio generador:

$$I = \frac{E}{R + r_i} = \frac{12}{3 + 0,2} = 3,75 \text{ A}$$

$$V_b = E - r_i \cdot I = 12 - 0,2 \cdot 3,75 = 11,25 \text{ V}$$

$$P_p = r_i \cdot I^2 = 0,2 \cdot 3,75^2 = 2,8 \text{ W}$$

$$P_T = E \cdot I = 12 \cdot 3,75 = 45 \text{ W}$$

$$P_u = V_b \cdot I = 11,25 \cdot 3,75 = 42,2 \text{ W}$$

Comprobaremos si se cumple que $P_T = P_u + P_p = 42,2 + 2,8 = 45 \text{ W}$

El rendimiento eléctrico será entonces $\eta_{eléctrico} = \frac{P_u}{P_T} 100 = \frac{42,2}{45} 100 = 93,8\%$

Este resultado nos indica que cada 100 W que produce el generador; 93,8 W son útiles.

Conexión de generadores en serie

La conexión de generadores en serie se utiliza cuando queremos aumentar la tensión de salida. Esta forma de conexión es muy utilizada en las baterías de acumuladores, donde se consigue la tensión de salida buscada a base de conectar varios acumuladores en serie.

Esta conexión consiste en agrupar los generadores uno seguido del otro conectándolos entre sí por sus polos contrarios y dejando dos terminales libres, que consituyen el positivo y negativo del agrupamiento. En la Figura 7.2 se muestra la conexión de 3 acumuladores en serie.

En la conexión en serie se cumple que:

- La fuerza electromotriz del conjunto es igual a la suma de las fuerzas electromotrices de cada uno de los generadores.

$$E = E_1 + E_2 + E_3$$

- La resistencia interna del conjunto es igual a la suma de las resistencias internas de cada uno de los generadores.

$$r = r_1 + r_2 + r_3$$

- La intensidad de la corriente eléctrica es igual en todos los generadores.

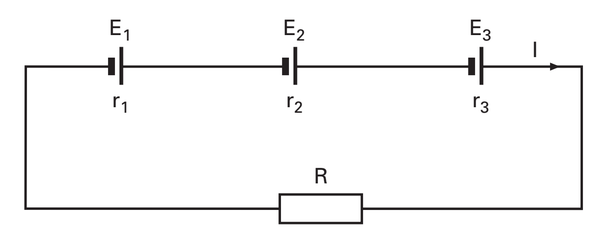


Figura 7.2

Ejemplos

7.2 Una batería está compuesta por 6 acumuladores conectados en serie. La f.e.m. de cada acumulador es de 1,5 voltios y su resistencia interna de 0,1 ohmios. Calcular: **a.** la corriente y tensión que aparecerá al conectar una carga de 5 ohmios de resistencia, **b.** la tensión en bornes vacío (sin conectar carga), **c.** intensidad si se cortocircuita la carga (unir eléctricamente mediante un conductor los dos terminales de la batería).

Solución: $E = E_1 + E_2 + ... + E_6 = 6 \cdot 1{,}5 = 9 \text{ V}$

$$r = r_1 + r_2 + ... + r_6 = 6 \cdot 0{,}1 = 0{,}6 \; \Omega$$

El agrupamiento de los acumuladores en serie equivale entonces a uno solo de f.e.m. 9 V y resistencia interna 0,6 Ω.

a. La corriente la determinamos aplicando la ley de Ohm entre los extremos de la batería:

$$I = \frac{E}{R + r} = \frac{9}{5 + 0{,}6} = 1{,}61 \text{ A}$$

La tensión en la carga la calculamos aplicando la ley de Ohm entre sus extremos:

$$V = R \cdot I = 5 \cdot 1{,}61 = 8 \text{ V}$$

b. Cuando se abre el circuito de alimentación, la corriente se interrumpe y por tanto la caída de tensión en la resistencia interna de los acumuladores se hace cero, apareciendo en la salida una tensión igual a la fuerza electromotriz:

$$V_b = E - rI = 9 - 0{,}6 \cdot 0 = 9 \text{ V}$$

c. Al provocar el cortocircuito la resistencia del receptor se vuelve aproximadamente igual a cero, por lo que la corriente que se alcanza es igual a:

$$I = \frac{E}{R + r} = \frac{9}{0 + 0,6} = 15 \text{ A}$$

Conexión de generadores en paralelo

La conexión de generadores en paralelo se utiliza cuando queremos aumentar la corriente de salida manteniendo la tensión constante. En la Figura 7.3 se han conectado tres generadores electroquímicos en paralelo.

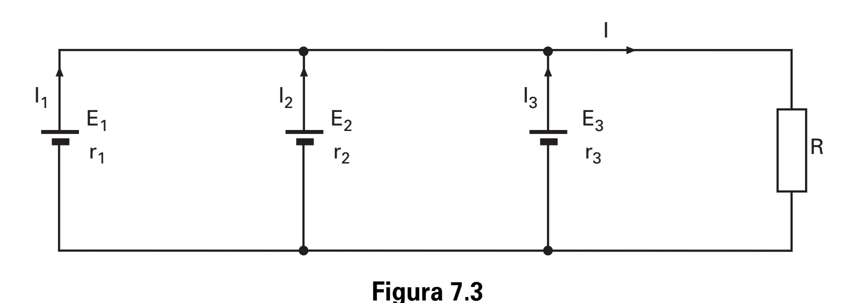


Figura 7.3

En la conexión en paralelo se poseen las siguientes características:

- Para que todos los generadores aporten energía deberán poseer la misma f.e.m.
- La f.e.m. equivalente al conjunto es la misma que la de los generadores acoplados.
- Si deseamos que todos los generadores aporten la misma corriente y potencia, además de ser igual su f.e.m. también deberán ser iguales sus resistencias internas.
- La intensidad que suministra el conjunto de generadores es igual a la suma de la intensidades que aporta cada generador.

Ejemplos

7.3 Se conectan en paralelo tres generadores de 12 V de f.e.m. y 0,3 ohmios de resistencia interna. Determinar la intensidad y tensión que aparecerá en los terminales del conjunto al conectar una resistencia de 4 ohmios. ¿Qué corriente aporta cada generador?

Solución: Determinaremos primero la f.e.m. y la resistencia interna equivalente del acoplamiento:

$$E = E_1 = E_2 = E_3 = 12 \text{ V}$$

Como las resistencias están conectadas en paralelo y son iguales:

$$r = \frac{0,3}{3} = 0,1\ \Omega$$

De lo que resulta que el acoplamiento en paralelo de los tres generadores equivale a uno solo de 12 V de f.e.m. y 0,1 ohmios de resistencia interna.

$$I = \frac{E}{R + r} = \frac{12}{4 + 0,1} = 2,93 \text{ A}$$

La tensión que aparece en los terminales del conjunto de generadores es:

$$V_b = E - r \cdot I = 12 - 0,1 \cdot 2,93 = 11,7 \text{ V}$$

La corriente que suministra cada generador es:

$$I_1 = I_2 = I_3 = \frac{I}{3} = \frac{2,93}{3} = 0,98 \text{ A}$$

Acoplamiento mixto de generadores

En el montaje mixto se acoplan los generadores tanto en serie como en paralelo. Así se consigue la tensión y corriente según las necesidades de la aplicación (Figura 7.4).

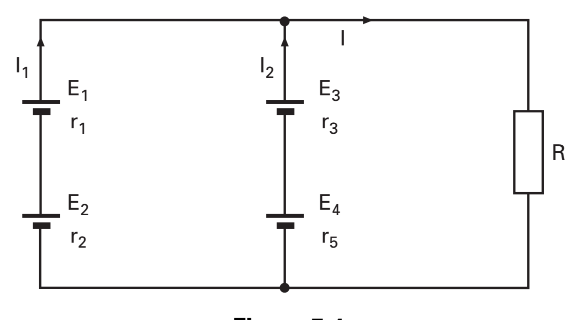


Figura 7.4

Ejemplos

7.4 En el acoplamiento mixto de generadores de la Figura 7.4 todos los generadores son de las mismas características, siendo cada una de las f.e.m. 6 V y cada una de las resistencias internas 0,2 ohmios. Determinar la

intensidad y tensión que aparecerá en los terminales del conjunto al conectar una resistencia de carga de 5 ohmios. ¿Qué corriente aporta cada generador?

Solución: Al igual que en otras ocasiones, primero calculamos la f.e.m. y la resistencia interna equivalente del acoplamiento.

En este caso la f.e.m. equivalente se corresponde con la de cada rama:

$$E = E_1 + E_2 = E_3 + E_4 = 6 + 6 = 12 \text{ V}$$

La resistencia interna de cada rama es $r = r_1 + r_2 = r_3 + r_4 = 0{,}2 + 0{,}2 = 0{,}4\ \Omega$

Como son dos ramas iguales de 0,4 ohmios conectadas en paralelo: la resistencia interna equivalente es:

$$r = \frac{0{,}4}{2} = 0{,}2\ \Omega$$

El resultado del acoplamiento equivale a un generador de 12 V y 0,2 ohmios.

$$I = \frac{E}{R + r} = \frac{12}{5 + 0{,}2} = 2{,}3 \text{ A}$$

$$V_b = E - r \cdot I = 12 - 0{,}2 \cdot 2{,}3 = 11{,}54 \text{ V}$$

La corriente es igual por cada rama y se corresponde con la que suministra cada generador. Como son dos ramas:

$$I_1 = I_2 = \frac{I}{2} = \frac{2{,}3}{2} = 1{,}15 \text{ A}$$

Nota: Para la resolución de estos ejercicios o algunos más complejos es perfectamente factible la aplicación de las leyes de Kirchhoff.

Resúmen de Conceptos

Dado que los generadores poseen resistencia interna, al ser recorrida por una corriente se produce una caída de tensión que disminuye la tensión que se presenta en sus bornes.

$$V_b = E - r_i \cdot I$$

Potencia perdida por el generador: $P_P = ri \cdot I^2$

Potencia total cedida por el generador: $P_T = E \cdot I$

Potencia útil cedida a la carga: $P_u = V_b \cdot I$

Rendimiento eléctrico de un generador: $\eta_{eléctrico} = \frac{P_u}{P_T} \cdot 100$

La conexión de generadores en serie se utiliza cuando queremos aumentar la tensión de salida: $E = E_1 + E_2 + E_3$ $\quad r = r_1 + r_2 + r_3$

La conexión de generadores en paralelo se utiliza cuando queremos aumentar la corriente de salida manteniendo la tensión constante:

$$I = I_1 + I_2 + I_3$$

Actividades

7.1. Se conectan en serie 10 generadores de C.C. de características iguales, siendo la f.e.m. de cada uno 2 voltios y su resistencia interna de 0,12 ohmios. Calcular **a.** tensión en bornes en vacío, **b.** tensión y corriente si se conecta una carga de 8 ohmios, **c.** rendimiento eléctrico del conjunto de generadores para dicha carga, **d.** corriente de cortocircuito, **e.** tensión en bornes del conjunto cuando suministra una corriente de 2 amperios.

Resultado: a. 20 V; **b.** 17,4 V; 2,17 A; **c.** 87 %, **d.** 16,7 A; **e.** 17,6 V.

7.2. Resolver las mismas cuestiones planteadas en la actividad 7.1 si en vez de conectar los generadores en serie los acoplamos en paralelo.

Resultado: a. 2 V; **b.** 1,99 V; 0,25 A; **c.** 99 %, **d.** 166 A; **e.** 1,98 V.

7.3. Una batería de acumuladores está formada por 10 elementos conectados en serie de 2,5 V y 0,015 Ω. Se conecta un receptor entre sus extremos y se miden 17,5 V. Determinar: **a.** intensidad, resistencia y potencia de la carga, **b.** potencia útil cedida por cada generador.

Resultado: a. I = 50 A; R = 0,35 Ω; P = 875 W **b.** P_u = 87,5 W.

7.4. ¿Cuántos generadores de: (E = 24 V; r = 0,2 Ω) hay que conectar en serie para conseguir una tensión de 220 V en una resistencia de carga de 22 Ω?

a. ❑ 10 generadores.

b. ❑ 9 generadores

c. ❑ No es posible la conexión

7.5. ¿Cuántos generadores con las mismas características que en la actividad 7.4 hay que conectar en paralelo para conseguir que la resistencia de carga de 0,22 Ω conectada a sus extremos trabaje a 22 V?

a. ❑ 5 generadores.

b. ❑ 10 generadores.

c. ❑ 4 generadores.

7.6. ¿Cuántos generadores de E = 4,5 V; r = 0,1 Ω y cómo se tendrán que conectar para conseguir una tensión a la salida de 8,8 V al suministrar 3 A a una carga.

a. ❑ 4 generadores conectados en circuito mixto: dos ramas en paralelo y cada una de ellas compuesta por dos generadores conectados en serie.

b. ❑ 2 generadores conectados en serie.

c. ❑ 6 generadores conectados en circuito mixto: tres ramas en paralelo y cada una de ellas compuesta por dos generadores conectados en serie.



Cálculo de la sección de conductores

La sección de conductor es la superficie que aparece cuando le cortamos perpendicularmente a su longitud. Por lo general los conductores son cilíndricos, por lo que la sección suele ser un área circular (Figura 8.1). La sección de los conductores se suele expresar en mm^2.

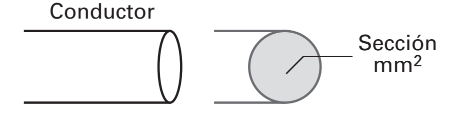


Figura 8.1

Dado que los conductores no son perfectos y que poseen una cierta resistencia eléctrica, cuando son atravesados por una corriente eléctrica se producen dos fenómenos:

- Se calientan y pierden potencia.
- Al estar conectados en serie con los aparatos eléctricos que alimentan, se produce una caída de tensión que hace que se reduzca apreciablemente la tensión al final de la línea.

Éstos son los dos factores más importantes que hay que tener en cuenta a la hora de seleccionar la sección más adecuada para una instalación eléctrica.

Cálculo de la sección teniendo en cuenta el calentamiento de los conductores

El calor que producen los conductores es proporcional a la potencia P_{PL} que se pierde en ellos. Ésta aumenta con la resistencia del conductor (R_L) y con la intensidad de corriente al cuadrado (I^2) que conduce.

$$P_{PL} = R_L \cdot I^2$$

Dado que la resistencia del conductor depende de su sección, si queremos conseguir pérdidas de potencias bajas deberemos aumentar considerablemente su sección.

Ejemplos

8.1 Calcular la potencia que se pierde en un conductor de cobre de 100 m de longitud y 1,5 mm² de sección que alimenta a un motor eléctrico de 3 KW de potencia a una tensión de 220 V.

Solución: Primero se calcula la intensidad de corriente que fluye por el conductor:

$$I = \frac{P}{V} = \frac{3.000}{220} = 13,6 \text{ A}$$

Ahora calcularemos la resistencia del conductor:

$$R_L = \rho \frac{L}{S} = 0,017 \frac{100}{1,5} = 1,13\ \Omega$$

Ya podemos calcular la potencia perdida en el conductor y que se transforma en calor:

$$P_{PL} = R_L \cdot I^2 = 1,13 \cdot 13,6^2 = 209 \text{ W}$$

La potencia perdida en un conductor produce calor que al acumularse, eleva su temperatura, pudiendo llegar a fundir el aislante del conductor (el plástico que rodea el conductor). Esto puede llegar a ser muy peligroso ya que podrían originarse incendios. Por otro lado, los aislantes al estar sometidos a estas temperaturas, pierden parte de su capacidad para aislar y envejecen con rapidez, lo que les hace quebradizos y prácticamente inservibles.

8.2 ¿Cuál sería la pérdida de potencia si aumentamos la sección de los conductores del ejemplo 8.1 a 4 mm²?

Solución: P_{PL} = 78 W

Está claro que al aumentar la sección del conductor, disminuye la pérdida de potencia y, por tanto, el calor producido por el mismo.

El calentamiento de un conductor, entre otros factores, depende de la intensidad de corriente que circule por él. Luego cuanto mayor sea la corriente que circula por un conductor, mayor tendrá que ser la sección de éste para que no se caliente excesivamente.

Dado que el calor se va a concentrar más en un conductor instalado bajo tubo que en un conductor instalado al aire, también habrá que tener en cuenta, a la hora de determinar la sección, la forma de instalar los conductores. Por el mismo razonamiento también hay que tener en cuenta la forma de agrupación de los conductores:

- Conductores unipolares: línea formada por conductores separados.
- Conductores bipolares: línea formada por dos conductores unidos por material aislante.
- Conductores tripolares: línea formada por tres conductores unidos por material aislante.

Son los fabricantes de conductores eléctricos los que tienen que indicar la intensidad que soportan éstos (intensidad máxima admisible) en función de las condiciones de instalación. Pero, para que no existan fraudes a este respecto, el Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión (R.B.T.) edita diferentes tablas de consulta con las que se pueden calcular la secciones de conductores.

En la Tabla 8.1 se indican las intensidades admisibles para una temperatura ambiente del aire de 40 ºC y para distintos métodos de instalación, agrupamientos y tipos de cables.

Intensidades admisibles (A) para una temperatura ambiente de 40 °C. Nº de conductores con carga y naturaleza del aislamiento

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
A	Conductores aislados en tubos empotrados en paredes aislantes		3x PVC	2x PVC		3x XLPE o EPR	2x XLPE o EPR					
A2	Cables multiconductores en tubos empotrados en paredes aislantes	3x PVC	2x PVC		3x XLPE o EPR	2x XLPE o EPR						
B	Conductores aislados en tubos(2) en montaje superficial o empotrados en obra				3x PVC	2x PVC			3x XLPE o EPR	2x XLPE o EPR		
B2	Cables multiconductores en tubos(2) en montaje superficial y empotrados en obra			3x PVC	2x PVC		3x XLPE o EPR		2x XLPE o EPR			
C	Cables multiconductores directamente sobre la pared (3)					3x PVC	2x PVC		3x XLPE o EPR	2x XLPE o EPR		
E	Cables multiconductores al aire libre(4). Distancia a la pared no inferior a 0,3D						3x PVC		2x PVC	3x XLPE o EPR	2x XLPE o EPR	
F	Cables unipolares en contacto mutuo. Distancia a la pared no inferior a D							3x PVC			(1) 3x XLPE o EPR	
G	Cables unipolares separados mínimo D *D es el diámetro del cable*									(1) 3x PVC		3x XLPE o EPR
	Sección mm²	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**
	1,5	11	11,5	13	13,5	15	16	-	18	21	24	-
	2,5	15	16	17,5	18,5	21	22	-	25	29	33	-
	4	20	21	23	24	27	30	-	34	38	45	-
	6	25	27	30	32	36	37	-	44	49	57	-
	10	34	37	40	44	50	52	-	60	68	76	-
	16	45	49	54	59	66	70	-	80	91	105	-
	25	59	64	70	77	84	88	96	106	116	123	166
	35		77	86	96	104	110	119	131	144	154	205
	50		94	103	117	125	133	145	159	175	188	250
	70				149	160	171	188	202	224	244	321
	95				180	194	207	230	245	271	296	391
	120				208	225	240	267	284	314	348	455
	150				236	260	278	310	338	363	404	525
	185				268	297	317	354	386	415	464	601
	240				315	350	374	419	455	490	552	711
	300				360	404	423	484	524	565	640	821
	Tabla 8.1	**Intensidades en Amperios para conductores de cobre**										

(1) A partir de 25 mm²
(2) Incluyendo canales para instalaciones, canaletas y conductos de sección no circular
(3) O en bandeja no perforada
(4) O en bandeja perforada

3xPVC = línea formada por tres conductores unipolares o uno tripolar aislados con Policloruro de vinilo
2xPVC = línea formada por dos conductores unipolares o uno bipolar aislados con Policloruro de vinilo
3xPVC = línea formada por tres conductores unipolares o uno tripolar aislados con Polietileno reticulado (XLPE) o Etileno propileno (EPR)
2xPVC = línea formada por dos conductores unipolares o uno bipolar aislados con Polietileno reticulado (XLPE) o Etileno propileno (EPR)

Tabla 8.1

Ejemplos

8.3 ¿Cuál será la intensidad máxima que podrán conducir los conductores de una línea bipolar aislada con PVC e instalada directamente sobre la pared si su sección es de 10 mm^2? ¿Y si se instala bajo tubo?

Solución: Consultando la Tabla 8.1:

Para "cables multiconductores instalados directamente sobre la pared" "2xPVC" nos encontramos en la columna nº 6, que nos indica que para una sección de 10 mm^2 la intensidad máxima admisible es de 52 A.

Para "cables multiconductores instalados en tubos empotrados en paredes aislantes" "2xPVC" nos encontramos en la columna nº 2, que nos indica que para una sección de 10 mm^2 la intensidad máxima admisible es de 37 A.

8.4 Para la alimentación eléctrica de un horno se utiliza una línea formada por dos conductores unipolares aislados con Polietileno reticulado (XLPE) instalados bajo tubo. Calcular la sección de los conductores si la corriente que absorbe el horno es de 25 A.

Solución: Consultando la Tabla 8.1: Para "cables aislados instalados en tubos empotrados en paredes aislantes" "2xXLPE" nos encontramos en la columna nº 6, donde para una sección del conductor de 4 mm^2 la intensidad máxima admisible es de 30 A.

Densidad de corriente de un conductor

La densidad de corriente de un conductor nos indica los amperios por milímetro cuadrado que circulan por él:

$$\delta = \frac{I}{S} \text{ en } \mathrm{A/mm^2}$$

La densidad de corriente del conductor del ejemplo 8.4 sería entonces:

$$\delta = \frac{I}{S} = \frac{30}{4} = 7{,}5 \ \mathrm{A/mm^2}$$

La densidad de corriente admisible por un conductor depende de las condiciones de instalación, tipo de cable y sección del conductor (según aumenta la sección, el calor se disipa peor y la densidad admisible disminuye).

Por qué se emplean altas tensiones en el transporte de energía eléctrica

Veamos un ejemplo: Deseamos generar y transportar por una línea una pequeña potencia de 1.000 W. ¿Qué tensión utilizaremos? Estudiaremos dos casos extremos:

Con una tensión de 1.000 V: $P = V \cdot I \Rightarrow I = \frac{P}{V} = \frac{1.000}{1.000} = 1\ \text{A}$

Con una tensión de 1 V: $I = \frac{P}{V} = \frac{1.000}{1} = 1.000\ \text{A}$

Queda claro con este ejemplo que al aumentar la tensión reducimos la intensidad y, por tanto, la sección de los conductores podrá ser más reducida. A su vez, se reducen las pérdidas caloríficas en los conductores ($P_{PL} = R_L \cdot I^2$). Tampoco conviene la utilización de tensiones demasiado elevadas, ya que esto trae también consigo un encarecimiento de los aislantes (torres más altas, cables más separados, aislantes más perfectos, inclusión de sofisticados sistemas de seguridad, etc.)

En general se busca un compromiso entre la potencia a transportar, la tensión a utilizar y la intensidad de la línea. La solución que resulte más económica es la que se empleará.

Caída de tensión en las líneas eléctricas

Seguro que habrás podido observar cómo en ciertas ocasiones la luz que emiten las lámparas eléctricas que están conectadas a la red eléctrica cambia un poco de luminosidad.

Estos fenómenos son debidos a que las líneas producen una cierta pérdida de tensión.

Como todos sabemos, las líneas que transportan la energía eléctrica están compuestas por conductores eléctricos de una cierta resistencia que, al ser recorridos por una corriente eléctrica se calientan y, por tanto, producen una pérdida de potencia. Pues bien, también hay que pensar que los conductores de las líneas están conectados en serie con los receptores, y que al ser recorridos por la corriente ocasionan una caída de tensión. De tal forma, que la tensión que le llega al receptor es menor que la que existe al principio de la línea.

Ejemplos

8.5 Se desea suministrar energía eléctrica a un motor de 10 KW a 220 V. Para ello, se tiende una línea de cobre de 6 mm^2 de sección desde un transformador de distribución situado a 75 m (Figura 8.2). Calcular: **a.** la resistencia de la línea, **b.** intensidad del circuito, **c.** caída de tensión en la línea, **d.** tensión que tiene que suministrar el transformador, **e.** potencia perdida en la línea.

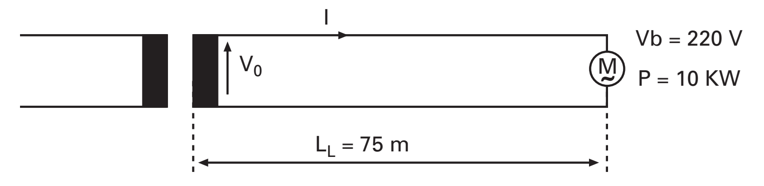


Figura 8.2

Solución a: Para calcular la resistencia de la línea hay que tener en cuenta que la longitud total del conductor son 75 + 75 = 150 m (conductor de ida + conductor de vuelta).

$$R_L = \rho \frac{L}{S} = 0,017 \frac{150}{6} = 0,43\ \Omega$$

Esta resistencia la podemos representar como si estuviese concentrada en un punto de la línea (Figura 8.3).

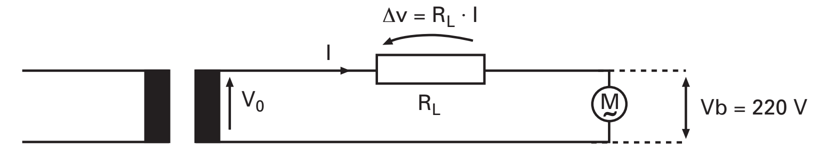


Figura 8.3

Solución b: La intensidad de la línea es: $I = \frac{P}{V} = \frac{10.000}{220} = 45,45\ \text{A}$

Solución c: La caída de tensión ΔV la calculamos aplicando la ley de Ohm entre los terminales de la hipotética resistencia de línea R_L cuando es recorrida por la intensidad I.

$$\Delta V = R_L \cdot I = 0,43 \cdot 45,45 = 19,5\ \text{V}$$

A veces, conviene expresar este resultado en tantos por ciento referidos a la tensión de alimentación. En nuestro caso:

$$\Delta V\% = \frac{19,5}{220} 100 = 8,9\%$$

Si aplicásemos las normas contempladas en el Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión (R.B.T.), habría que aumentar la sección de los conductores de la línea, ya que este porcentaje de caída de tensión es en cualquier caso inadmisible. El porcentaje máximo que se suele admitir para instalaciones de B.T. entre el origen de las mismas y cualquier punto de consumo es del 3 % del valor nominal para circuitos de alumbrado y del 5 % para los demás usos.

Solución d: La tensión en el transformador es:

$$V_0 = V_b + \Delta V = 220 + 19,5 = 239,5 \text{ V}$$

Solución e: La potencia que se pierde en la línea la calculamos con la expresión:

$$P_{PL} = R_L \cdot I^2 = 0,43 \cdot 45,45^2 = 888 \text{ W}$$

Cálculo de la sección teniendo en cuenta la caída de tensión

La caída de tensión en las líneas puede llegar a ser un problema para el correcto funcionamiento de los receptores, ya que éstos están diseñados para trabajar a una cierta tensión. Una tensión más baja puede impedir el arranque de un motor, el encendido de un tubo fluorescente, etc. Por todo ello, la caída de tensión no puede exceder de unos límites prefijados en el R.B.T. para cada caso. De esta forma, no sólo habrá que tener en cuenta el calentamiento del conductor para determinar su sección, sino que también será necesario no sobrepasar el porcentaje de caída de tensión prefijado en el R.B.T.

Ejemplos

8.6 Calcular la sección que le correspondería a una línea compuesta por dos conductores de cobre unipolares instalados bajo tubo y aislados con PVC de 100 metros de longitud, que alimenta a un taller de 15 KW/380 V, si la caída máxima de tensión que se admite es del 1% de la de alimentación (Figura 8.4).

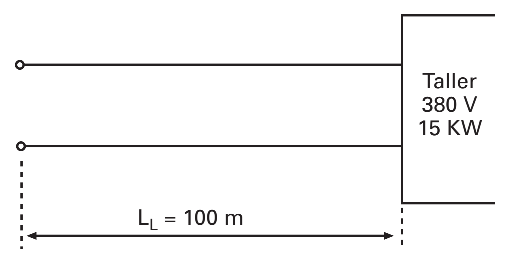


Figura 8.4

Solución:

Primero calculamos la intensidad: $I = \frac{P}{V} = \frac{15.000}{380} = 39,5 \text{ A}$

La caída de tensión en voltios la calculamos así: $\Delta V = \frac{380}{100} 1\% = 3{,}8 \text{ V}$

Ahora, vamos a encontrar la relación que existe entre la sección del conductor y esta caída de tensión:

$\Delta V = R_L \cdot I$ sustituimos R_L por su expresión general

$\Delta V = \rho \frac{L}{S} I$ despejando la sección:

$$S = \rho \frac{L}{\Delta V} I = 0{,}017 \frac{2 \cdot 100}{3{,}8} 39{,}5 = 35 \text{ mm}^2$$

La sección comercial que le corresponde es de 35 mm². Ahora comprobamos la intensidad máxima que admite este conductor según la Tabla 8.1: Dos conductores unipolares instalados bajo tubo de 35 mm² admiten una intensidad de 86 amperios sin calentarse excesivamente. Como la intensidad de la línea es inferior (39,5 A) damos como válido el resultado de 35 mm².

En el caso de que el conductor tuviese una $I_{máx.\ adm.}$ inferior a la que circula por la línea, habría que tomar una sección superior, predominando en este caso el cálculo de la sección por calentamiento de los conductores al cálculo por caída de tensión.

¿Qué sección le correspondería a esta línea si no se tuviese en cuenta la caída de tensión de la misma?: $S = 10 \text{ mm}^2$.

En resumen, siempre que necesitemos determinar la sección de un conductor emplearemos la siguiente expresión:

$$S = \rho \frac{2 \cdot L_L}{\Delta V} I$$

ρ = *Resistividad del conductor* ($\Omega \cdot$ mm²/m)
ΔV = *caída de tensión máxima en la línea* (V)
L_L = *distancia de la carga al punto de alimentación* (m)
I = *Intensidad por la línea* (A)
S = *sección del conductor de la línea* (mm²)

Para concluir recuérdese que para calcular la sección de los conductores de una línea hay que tener en cuenta dos aspectos fundamentales:

a. La caída de tensión máxima permitida.

b. Corriente máxima admitida por el conductor en función de su tipo e instalación (para evitar sobrecalentamientos).

Cuando se trata de líneas de corta longitud, la caída de tensión es pequeña y por tanto, predominará en el cálculo la sección determinada mediante la corriente admi-

sible. Para líneas más largas, la caída de tensión se hace considerable y, por lo general, es la que exige una sección mayor en el cálculo.

Ejemplos

8.7 Determinar la sección de los conductores de una línea compuesta por 1 cable bipolar de cobre y aislado con PVC e instalado bajo conducto que alimenta un vivienda unifamiliar mediante paneles fotovoltaicos. La longitud de la línea es de 8 m y se admite una caída de tensión del 4 %. La carga prevista es de 2 KW a 24 V.

Solución: Primero, calculamos la intensidad:

$$I = \frac{P}{V} = \frac{2.000}{24} = 83 \text{ A}$$

La caída de tensión máxima que se permite en voltios es:

$$\Delta V = \frac{24}{100} 4\% = 0,96 \text{ V}$$

La sección necesaria para no superar esta caída es:

$$S = \rho \frac{2 \cdot L_L}{\Delta V} I = 0,017 \frac{2 \cdot 8}{0,96} 83 = 23 \text{ mm}^2$$

La sección comercial que se fabrica es la superior: 25 mm^2

Al comprobar la intensidad admisible en la Tabla 8.1 observamos que este conductor admite 64 A. Dado que por él tienen que pasar 83 A, habrá que aumentar la sección hasta 50 mm^2 para que no se caliente excesivamente.

Resúmen de Conceptos

La sección de un conductor tiene que ser suficiente para que éste no se caliente excesivamente al paso de la corriente, además la caída de tensión no debe superar la máxima prescrita.

Los fabricantes de conductores eléctricos nos indican, mediante tablas, la intensidad que soportan éstos (intensidad máxima admisible) en función del tipo de conductor y las condiciones de instalación.

La densidad de corriente de un conductor nos indica los amperios por milímetro cuadrado que circulan por él:

$$\delta = \frac{I}{S} \text{ en } \mathrm{A/mm^2}$$

Para el transporte de grandes cantidades de energía eléctrica se emplean altas tensiones, ya que así se consigue reducir la corriente y con ella la sección de los conductores.

Los conductores de las líneas están conectados en serie con los receptores. Al ser recorridos por la corriente ocasionan una caída de tensión, que disminuye la tensión en el punto de alimentación de dicha línea.

La caída de tensión es proporcional a la corriente y al resistencia de la línea: $\Delta V = RL \cdot I$.

$$S = \rho \frac{2 \cdot L_L}{\Delta V} I$$

ρ = *Resistividad del conductor* ($\Omega \cdot \mathrm{mm^2/m}$)
ΔV = *caída de tensión máxima en la línea* (V)
L_L = *distancia de la carga al punto de alimentación* (m)
I = *Intensidad por la línea* (A)
S = *sección del conductor de la línea* ($\mathrm{mm^2}$)

Actividades

8.1. Si se consiguiese fabricar un material superconductor a la temperatura ambiente, ¿de qué forma afectaría a la instalación de líneas eléctricas?

- **a.** ❑ La ausencia de resistencia en el conductor provocaría un calentamiento inferior en los conductores.
- **b.** ❑ No les afectaría en absoluto.
- **c.** ❑ No serían necesarias las redes de alta tensión para el transporte de electricidad.

8.2. Con la ayuda de la Tabla 8.1, comprueba la densidad de corriente admisible para todas las secciones correspondientes a conductores de 4 mm^2 en diferentes formas de instalación y agrupación de conductores.

8.3. Se necesita instalar una motobomba de 7 KW a 220 V. Para ello, se tiende una línea bajo tubo, consistente en dos cables unipolares. ¿Cuál será la sección de los conductores, como mínimo, si éstos son de cobre aislados con PVC? Averiguar también la densidad de corriente del conductor. Se supone que la longitud del conductor es muy corta y, por tanto no se tiene en cuenta la caída de tensión.

Resultado: $S = 10\ mm^2$; $\delta = 3{,}2\ A/mm^2$

8.4. ¿Cuál sería la sección del conductor y la densidad de corriente, si para instalar la motobomba de la actividad 8.3, optamos por realizar la instalación mediante un cable bipolar instalado directamente sobre la pared?

Resultado: $S = 6\ mm^2$; $\delta = 5{,}3\ A/mm^2$

8.5. La potencia máxima que se espera que pueda consumir una cocina eléctrica de uso doméstico es de unos 4.400 W. Sabiendo esto, calcular la sección de los conductores del circuito que la alimenta, teniendo en cuenta que está conectada a una red de 220 V y que los conductores son de cobre aislados con PVC y que están instalados bajo tubo.

Resultado: Según la Tabla 8.1: 4 mm^2; sin embargo, el REBT nos indica que para este tipo de instalaciones, por cuestión de seguridad, la sección será como mínimo de 6 mm^2.

8.6. Un local posee una instalación de 20 puntos de luz de 100 W cada uno a una tensión de 220 V. Se quiere alimentar a través de una línea de cobre bipolar de 75 metros de longitud instalada al aire. Determinar la sección más recomendable para que la caída máxima de tensión no supere el 3% de la de alimentación. ¿Cuál será la densidad de corriente del conductor?

Resultado: S = 4 mm^2; δ = 2,27 A/mm^2.

8.7. La instalación de un pequeño taller se compone de los siguientes receptores: dos motores de C.C. de 4 KW cada uno, 20 puntos de luz de 100 W cada uno, cinco calefactores de 1,5 KW cada uno. La tensión de alimentación es de 380 V (Figura 8.5). Averiguar la sección de los conductores de la línea general si ésta se compone de un cable bipolar instalado bajo tubo y se admite una caída de tensión máxima del 4% de la de alimentación. Longitud de la línea 77 m.

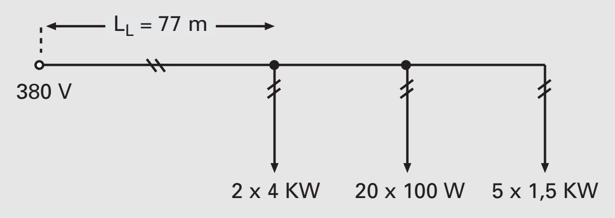


Figura 8.5

El esquema de la Figura 8.5 es del tipo unifilar. El trazo representa a la línea y el número de conductores de ésta se representa por unas rayitas cruzadas (como en nuestro caso la línea tiene dos conductores: //).

Resultado: S = 16 mm^2.



9 Efecto térmico de la electricidad

Hemos visto que los conductores y las resistencias se calientan cuando son atravesados por una corriente eléctrica. Este fenómeno es también conocido por "efecto Joule".

El físico P. James Joule estudió la relación que existe entre la energía y su transformación plena en calor. A base de experimentar con un calorímetro, llegó a la conclusión de que la energía de 1 Julio es equivalente a 0,24 calorías.

$$Q = 0,24 \cdot E$$

Q = Calor en calorías.
E = Energía en Julios.

De esta manera, si quisiéramos determinar el calor que se produce en una resistencia *R* en un tiempo determinado *t* cuando es recorrida por una corriente eléctrica *I*, tendremos que:

$E = P \cdot t$ a su vez $P = R \cdot I^2$ si llevamos estos valores a la primera expresión:

$$Q = 0,24 \cdot R \cdot I^2 \cdot t$$

Ejemplos

9.1 Calcular el calor desprendido por un horno eléctrico de 2.000 W en 5 minutos de funcionamiento.

Solución: La energía en julios consumida durante ese período de tiempo es:

$$E = P \cdot t = 2.000 \cdot 300 = 600.000 \text{ Julios}$$

$$t = 5 \cdot 60 = 300 \text{ s}$$

Como cada julio se transforma en 0,24 calorías, tendremos que:

$$Q = 0{,}24 \cdot E = 0{,}24 \cdot 600.000 = 144.000 \text{ calorías} = 144 \text{ Kcal.}$$

9.2 Calcular el calor desprendido por un conductor de cobre de 100 m de longitud y 1,5 mm² de sección que alimenta a un grupo de lámparas de 1.500 W de potencia a una tensión de 220 V durante un día.

Solución: Primero se calcula la intensidad de corriente que circula por dicho conductor:

$$I = \frac{P}{V} = \frac{1.500}{220} = 6{,}8 \text{ A}$$

Calculemos ahora la resistencia del conductor de la línea:

$$R = \rho \cdot \frac{L}{S} = 0{,}017 \cdot \frac{100}{1{,}5} = 1{,}13\ \Omega$$

El calor producido por el conductor, que eleva su temperatura y se contabiliza como energía pérdida es:

$$Q = 0{,}24 \cdot R \cdot I^2 \cdot t = 0{,}24 \cdot 1{,}13 \cdot 6{,}8^2 \cdot 86.400 = 1.083.481 \text{ cal}$$

$$t = 24 \text{ h} \cdot 60 \text{ m} \cdot 60 = 86.400 \text{ s}$$

La energía calorífica desarrollada por una resistencia calefactora o por un conductor cuando es atravesado por una corriente eléctrica tiende a elevar la temperatura del mismo. Esta elevación depende de varios factores, como son: calor específico de los materiales, su masa, su temperatura, los coeficientes de transmisión por donde se propaga y disipa el calor, etc.

Calor específico

El calor específico de una substancia es la cantidad de calor que se precisa para aumentar la temperatura en 1 °C una masa de 1 gramo.

Así, por ejemplo, para elevar la temperatura de un gramo de agua en un grado se necesita una caloría, bastante más que lo que se necesita para hacer lo mismo con un gramo de cobre (0,093 calorías). En la Tabla 9.1 se expone el calor específico de diferentes substancias expresado en calorías/gramo · °C

Substancia	Calor específico (Cal/gr ºC)
cobre	0,093
acero	0,110
PVC	0,210
aluminio	0,220
agua	1

Tabla 9.1

Conociendo el calor específico de una substancia y su masa es posible calcular la cantidad de calor que es necesario aplicar para elevar su temperatura. Para ello aplicaremos la expresión:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta t^\circ$$

Q = *cantidad de calor (calorías)*
m = *masa (gramos)*
c = *calor específico (cal/gr ºC)*
Δt° = *variación de temperatura*

Ejemplos

9.3 Determinar el calor necesario para elevar la temperatura de un litro de agua de 20 a 50 °C.

Solución: Como 1 litro de agua equivale a 1.000 gramos, el calor específico del agua es 1 y la elevación de temperatura que deseamos conseguir es (50 – 20) = 30 °C, el calor a aplicar es:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta t^\circ = 1.000 \cdot 1 \cdot 30 = 30.000 \text{ cal}$$

9.4 Determinar la potencia que deberá tener un termo eléctrico de agua para calentar un depósito de 50 litros en 1 hora. El agua entra a 12 °C y se desea calentarla hasta 60 °C. Calcular también el valor óhmico de la resistencia de caldeo para una tensión de 220 V.

Nota: Para hacer los cálculos no tener en cuenta el calentamiento de la cuba ni de la resistencia calefactora.

Solución: El calor que debe aportar la resistencia de caldeo es:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta t^o = 50.000 \cdot 1 \cdot (60 - 12) = 2.400.000 \text{ cal}$$

La energía eléctrica necesaria para producir este calor es:

$Q = 0,24 \cdot E$ despejando $E = \dfrac{Q}{0,24} = \dfrac{2.400.000}{0,24} = 10.000.000 \text{ julios}$

La potencia para desarrollar esta energía en 1 hora (3600 s) será:

$$P = \frac{E}{t} = \frac{10.000.000}{3.600} = 2.778 \text{ W} = 2,8 \text{ KW}$$

La resistencia la podemos calcular así:

$P = \dfrac{V^2}{R}$ despejando $R = \dfrac{V^2}{P} = \dfrac{220^2}{2.778} = 17,4\ \Omega$

9.5 Averiguar cuál será el costo de la energía del ejemplo 9.4 si el precio del KWh es de 17 pts.

Solución: La energía en KWh es: $E = P \cdot t = 2,8 \cdot 1 = 2,8 \text{ KWh}$

$$Gasto = 2,8 \cdot 17 = 47,6 \text{ pts}$$

9.6 Determinar el aumento de temperatura que experimentará una plancha eléctrica de acero si se la calienta mediante una resistencia de caldeo de 10 ohmios a 125 V durante 10 minutos. La plancha posee una masa de 7 kg y se supone que se pierde un 25 % del calor generado.

Solución: Calculamos primero el calor generado:

$$Q = 0,24 \cdot R \cdot I^2 \cdot t = 0,24 \cdot 10 \cdot 12,5^2 \cdot 600 = 225.000 \text{ cal}$$

$I = \dfrac{V}{R} = \dfrac{125}{10} = 12,5 \text{ A}$ $\qquad t = 10 \cdot 60 = 600 \text{ s}$

El calor transmitido a la plancha será sólo el 75 % del total generado:

$$Q = \frac{75}{100} \cdot 225.000 = 168.750 \text{ cal}$$

Como el calor específico del acero es 0,11 el incremento de temperatura será:

$Q = m \cdot c \cdot \Delta t°$ despejando $\Delta t° = \dfrac{Q}{m \cdot c} = \dfrac{168.750}{7.000 \cdot 0,11} = 219\ °C$

Transmisión de calor

La energía calorífica generada en un punto se transmite desde las zonas de más altas temperaturas a las más bajas. Esta transmisión puede conducirse de tres formas diferentes:

- **Conducción:** el calor se transmite por contacto íntimo entre dos materiales, como por ejemplo en los metales.

- **Convección:** todos los gases y líquidos, cuando se calientan se dilatan y disminuyen de densidad, lo que hace que tiendan a desplazarse. Así, por ejemplo, un radiador eléctrico, que transmita calor por convección (convector), calienta el aire que entra en contacto con su superficie, lo que hace que éste ascienda y se mueva por toda la estancia a calentar.

- **Radiación:** Este tipo de transmisión se produce por ondas y es similar a la que se produce por el Sol. De esta forma de transmisión se aprovechan elementos calefactores como, por ejemplo, las estufas de rayos infrarrojos, placas solares de alta temperatura, hornos eléctricos.

Resúmen de Conceptos

P. James Joule llegó a la conclusión de que la energía de 1 Julio cuando se transforma plenamente en calor es equivalente a 0,24 calorías.

$$Q = 0,24 \cdot E$$

Q = calor en calorías.
E = energía en Julios

$$Q = 0,24 \cdot R \cdot I^2 \cdot t$$

El **calor específico** de una substancia es la cantidad de calor que se precisa para aumentar la temperatura en 1 °C una masa de 1 gramo.

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta t°$$

Q = cantidad de calor (calorías
m = masa (gramos)
c = calor específico (cal/gr ºC)
Δt° = variación de temperatura

La energía calorífica se transmite desde las zonas de más altas temperaturas a las más bajas y puede conducirse por conducción, convección y radiación.

Actividades

9.1. Suponiendo dos conductores de la misma masa, uno de cobre y otro de aluminio, que al ser recorridos por una corriente eléctrica se calientan ¿Cuál de los dos conductores se elevará más de temperatura?

a. ❑ Toman los dos la misma temperatura por tener la misma masa.

b. ❑ El cobre por poseer un menor calor específico.

c. ❑ El aluminio por poseer un mayor calor específico.

9.2. Una plancha eléctrica basa su funcionamiento en la transmisión de calor por:

a. ❑ Radiación.

b. ❑ Convección.

c. ❑ Conducción.

9.3. Calcular el calor generado por un termo eléctrico de características 2.000 W/220 V durante 2 horas de funcionamiento.

Resultado: 3456 Kcal.

9.4. Calcular el tiempo aproximado que hay que tener conectada la resistencia calefactora de un calentador eléctrico de agua sanitaria de 3.500 vatios de potencia, si la capacidad de su depósito es de 75 litros, y el agua se calienta de 10 °C a 50 °C.

Resultado: 1 hora.

9.5. Un termo eléctrico de 1.500 W tarda en calentar 40 litros de agua una hora y media. Determinar el rendimiento del dispositivo si el agua entra a 12 °C y sale a 55 °C.

Resultado: 88,5 %.



10 Aplicaciones del efecto térmico

Gracias al efecto térmico se pueden construir multitud de dispositivos de gran aplicación práctica, como son: lámparas incandescentes, elementos de caldeo y fusibles.

Elementos de caldeo

Son resistencias preparadas para transformar la energía eléctrica en calor (Figura 10.1). Se utilizan para la fabricación de estufas, placas de cocina, hornos, planchas eléctricas, secadores, calentadores eléctricos de agua, soldadores, etc.

El calor eléctrico presenta múltiples ventajas frente a otras formas de producir calor, como son: ausencia de llama y gases de combustión, limpieza, facilidad para controlar y regular su funcionamiento.

Los elementos de caldeo se fabrican, por lo general, con hilos de aleaciones metálicas resistivas cubiertos por materiales aislantes que soportan altas temperaturas.



Figura 10.1

El elemento básico de control de temperatura que suelen poseer la mayoría de los aparatos calefactores es el termostato. Con este dispositivo prefijamos la temperatura de funcionamiento del aparato. Una vez alcanzada dicha temperatura el termostato abre el circuito y desconecta el calefactor hasta que la temperatura vuelve a descender, momento en el cual se vuelve a cerrar el circuito. De esta forma, abriendo y cerrando el circuito de alimentación del calefactor se consigue mantener la temperatura prefijada (Figura 10.2).

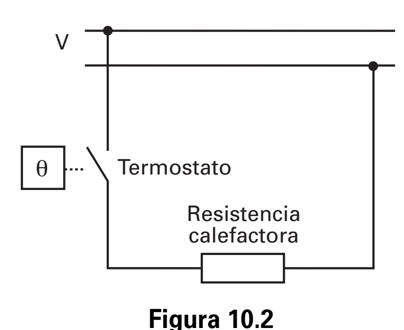


Figura 10.2

Los termostatos pueden ser de varios tipos, los más utilizados son los bimetálicos y los electrónicos.

En la Figura 10.3 se puede apreciar la composición de un termostato bimetálico. El elemento fundamental es el bimetal, que está fabricado a base de unir dos metales de muy diferente coeficiente de dilatación. Al calentarse, una de las láminas tiende a estirarse más que la otra y provoca un arqueo del bimetal. Este movimiento puede aprovecharse para abrir o cerrar un contacto eléctrico.

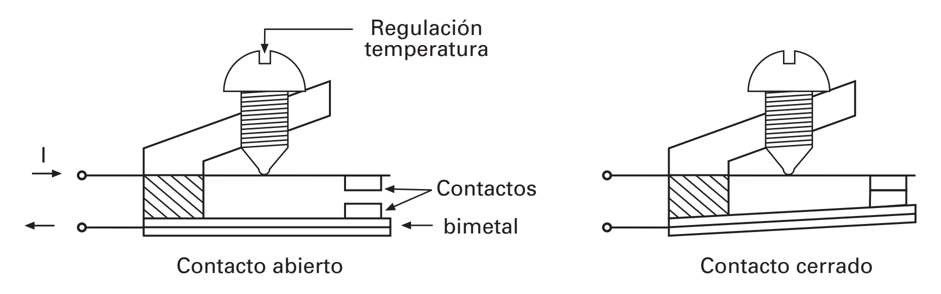


Figura 10.3

Los termostatos no sólo son útiles para prefijar la temperatura, por ejemplo, de una habitación o del agua de un termo eléctrico, si no también como elemento de seguridad en los calefactores, ya que así aseguramos que la temperatura de funcionamiento de los aparatos nunca alcance valores peligrosos. Por ejemplo, los secadores de pelo llevan integrado un pequeño termostato en el interior del aparato; así nos aseguramos que aunque el motor que ventila a la resistencia de caldeo deje de funcionar, la temperatura

de las resistencias calefactoras no podrán alcanzar temperaturas peligrosas, ya que en este caso el termostato abre el circuito de alimentación hasta que se disminuya la temperatura.

Lámparas incandescentes

El funcionamiento de una lámpara incandescente es muy sencillo. Al atravesar la corriente por un filamento resistivo, éste alcanza una gran temperatura (unos 2.000 °C) poniéndose al rojo blanco, o sea incandescente, lo que provoca una emisión de radiaciones luminosas (Figura 10.4).

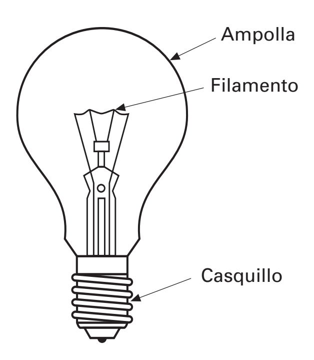


Figura 10.4

Las lámparas incandescentes son muy utilizadas por su bajo coste y por la facilidad de su montaje. Sin embargo, poseen un rendimiento luminoso bastante bajo frente a otro tipo de lámparas, como por ejemplo las fluorescentes. Además, la duración de las mismas no suele superar la 1.000 horas de funcionamiento.

Estudiemos, a continuación, las partes de que se compone una lámpara incandescente, así como algunas de sus características más importantes.

- **Filamento:** El filamento es un conductor resistivo, de tungsteno o wolframio, cuya temperatura de fusión es de unos 3.400 °C. La vida o duración del filamento viene condicionada por un fenómeno de evaporación del mismo. Hay que pensar que dicho filamento está sometido a muy altas temperaturas, lo cual provoca una emisión de partículas, por parte de éste, que van adelgazándolo y produciendo al cabo del tiempo su rotura (entonces solemos decir que la lámpara se ha fundido). Como ya se ha comentado, la duración media de este tipo de lámparas viene a ser de unas 1.000 horas de funcionamiento. Para evitar este fenómeno de evaporación se disponen los filamentos en forma de hélice, al tiempo que se rellena la ampolla con un gas inerte (mezcla de argón y nitrógeno) a una determinada presión.

- **Ampolla:** La misión principal de la ampolla es aislar al filamento del medio ambiente. Si un filamento se pusiera en estado incandescente en contacto con la atmósfera, el oxígeno contenido en ésta produciría la combustión inmediata del mismo. Otra misión importante de la ampolla es la de permitir la evacuación del calor emitido por el filamento al ambiente.
- **Flujo luminoso emitido por una lámpara:** es la cantidad de luz radiada o emitida por una fuente luminosa durante un segundo. Su unidad de medida es el ***lumen (lm).*** El flujo luminoso de una lámpara incandescente aumenta con la potencia de la lámpara.
- **Rendimiento luminoso:** La misión de una lámpara es transformar la energía eléctrica en luminosa. Pero no toda la energía eléctrica es aprovechada y transformada en luz, sino que hay una parte que se pierde en calor.

  El rendimiento luminoso nos dice los lúmenes que la lámpara emite por cada vatio de potencia eléctrica que absorbe de la red. Para calcularlo, basta con dividir el flujo total que emite la lámpara entre la potencia eléctrica absorbida. El rendimiento luminoso se expresa, entonces, en lm/W.

  Así, por ejemplo, mientras que una lámpara incandescente de 40 W produce un flujo luminoso de 430 lm, una fluorescente de la misma potencia produce 3.200 lm. Los rendimientos de ambas lámparas serán:

  Lámpara incandescente: $\frac{430}{40} = 10,7$ 1m/W

  Lámpara fluorescente: …… = 80 lm/W

Inconvenientes del efecto térmico

El efecto térmico se vuelve indeseable cuando no es esperado. Éste caso se da:

- En el calentamiento de conductores en las líneas eléctricas, lo que nos condiciona la sección de los conductores en función de la intensidad de la corriente que los atraviesa.
- En los conductores que forman los bobinados de transformadores, motores y generadores que nos limita su potencia nominal.
- En resistencias que tienen la misión de limitar corriente y tensión al ser conectadas en serie con la carga (reostatos, potenciómetros, resistores en circuitos electrónicos, etc.)
- En ciertos fallos como el cortocircuito y la sobrecarga que pueden llegar a dañar las instalaciones eléctricas si no se emplea la protección adecuada.

El cortocircuito

El cortocircuito se produce cuando se unen accidentalmente las dos partes activas del circuito eléctrico. Estos accidentes suelen ser provocados por un error en el montaje de la instalación, fallo de un aislamiento que separa las partes activas o por una falsa maniobra. (Figura 10.5).

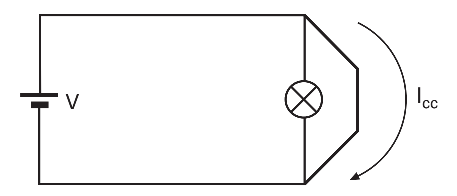


Figura 10.5

> ***Experiencia 10.1***
>
> Vamos a comprobar experimentalmente el efecto del cortocircuito. Para ello consigue una pila y una lámpara y conéctalos. Seguidamente une mediante un conductor los terminales de la lámpara (Figura 10.5).
>
> Se podrá observar como la lámpara se apaga, ya que toda la corriente eléctrica tiende a derivarse por el conductor de menos resistencia que el filamento. Mediante un amperímetro comprueba el valor de la corriente.
>
> Esta experiencia es posible de realizar gracias a que la pila no es capaz de suministrar una corriente muy grande, ya que de haber provocado un cortocircuito, por ejemplo, en una base de enchufe de la red eléctrica, la corriente habría alcanzado valores muy elevados y peligrosos para los conductores eléctricos.

En un cortocircuito la intensidad de corriente que aparece es muy elevada, debido a que la única resistencia que existe en el circuito es la propia de los conductores de línea (Figura 10.6).

$$I_{cc} = \frac{V}{R_{L\ nea}}$$

Figura 10.6

Ejemplos

10.1 Determinar la intensidad de cortocircuito que aparecerá en una toma de corriente si la energía proviene de una batería de acumuladores de 24 V de f.e.m. y 0,1 ohmios de resistencia interna y la línea de alimentación consiste en cable de cobre 4 mm^2 de sección con una longitud total de 10 m.

Solución: La resistencia del conductor es:

$$R_L = \rho \cdot \frac{L}{S} = 0,017 \cdot \frac{10}{4} = 0,0425\ \Omega$$

La resistencia total del circuito será entonces:

$$R_T = R_L + r = 0,0425 + 0,1 = 0,1425\ \Omega$$

La corriente de cortocircuito queda limitada por esta pequeña resistencia:

$$I_{CC} = \frac{V}{R_T} = \frac{24}{0,1425} = 168\ \text{A}$$

En el caso de que la resistencia del cortocircuito sea muy baja o cuando trabajamos con tensiones elevadas se pueden llegar a establecerse miles de amperios. Si esta fuerte intensidad no se corta inmediatamente, los conductores se destruyen por efecto del calor ($Q = 0,24 \cdot R_{Línea} \cdot I^2 \cdot t$) en un corto período de tiempo (a veces no llega a unos pocos milisegundos).

La sobrecarga

Se produce una sobrecarga cuando hacemos pasar por un conductor eléctrico más intensidad de corriente que la nominal (intensidad para la que ha sido calculada la línea).

Las sobrecargas pueden venir provocadas por conectar demasiados receptores en una línea eléctrica, por un mal funcionamiento de un receptor que tiende a un mayor consumo eléctrico o por un motor eléctrico que es obligado a trabajar a más potencia que su nominal.

Las sobrecargas originan un aumento de intensidad por los conductores que, con el tiempo suficiente, puede llegar a provocar su destrucción por elevación de temperatura.

Para medir una sobrecarga hay que tener en cuenta dos factores:

- El número de veces que se supera la intensidad nominal.
- El tiempo que dura la sobrecarga.

Una sobrecarga provoca daños cuando estos dos factores son considerables. Así, por ejemplo, si provocamos una sobrecarga en un conductor de dos veces su intensidad nominal durante unos pocos segundos, seguro que el mismo no sufre daños. Sin embargo si el tiempo es de horas, esta sobreintensidad puede llegar a dañar seriamente los aislantes del conductor.

Protección de los circuitos contra cortocircuitos y sobrecargas

Los excesos de temperatura de un conductor lo pueden destruir inmediatamente. Este es el caso del cortocircuito (corriente muy elevada que no puede durar mucho tiempo porque destruye todo los elementos de la instalación que se encuentran a su paso). Las sobrecargas tardan más en dañar el conductor. Aun así, los excesos constantes de temperatura de los materiales aislantes hacen que se envejezcan con más rapidez, limitando la vida útil del conductor (los aislantes sometidos a altas temperaturas acaban volviéndose quebradizos y perdiendo parte de sus propiedades aislantes).

Para la protección contra cortorcircuitos y sobrecargas se emplean los fusibles y los interruptores automáticos.

Fusibles

Un fusible está compuesto por un hilo conductor de menor sección que los conductores de la línea. En caso de una sobrecarga o cortocircuito, la intensidad se eleva a valores peligrosos para los conductores de la línea, y el fusible, que es más débil, se funde debido al efecto Joule, e interrumpe el circuito antes de que la intensidad de la corriente alcance esos valores peligrosos (Figura 10.7).

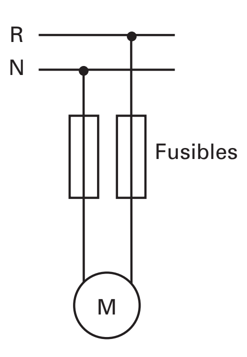
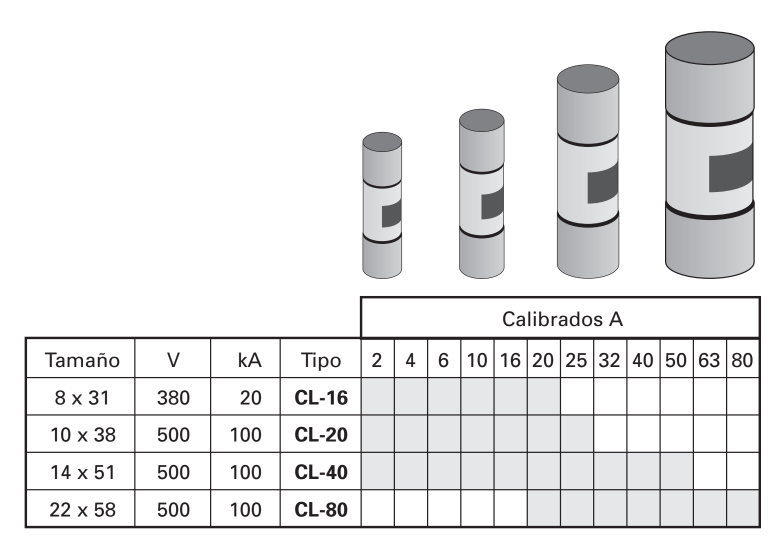


Figura 10.7

Para que el hilo fusible se caliente antes que los conductores de la línea, debe ser de mayor resistencia eléctrica. Esto se consigue con un hilo de menor sección o con un hilo de mayor coeficiente de resistividad. Por otro lado, este hilo debe tener un punto de fusión más bajo que los conductores de línea que protege.

Hoy en día, para la fabricación de hilos fusibles, se emplean aleaciones especiales estudiadas para conseguir los mejores resultados. Estas aleaciones pueden ser de cobre-plata, plomo-estaño, etc.

Cuando un hilo fusible se funde, las gotas de material en estado líquido se proyectan, lo que puede producir quemaduras y accidentes, incluido el peligro de incendio. Por esta razón, los hilos fusibles se deben colocar en el interior de recipientes herméticamente cerrados, dando así lugar a los llamados cartuchos fusibles. En la Figura 10.8 se muestra, como ejemplo, el aspecto de una gama de cartuchos fusibles comerciales de diferente tamaño, así como sus calibres en amperios.



				Calibrados A											
Tamaño	V	kA	Tipo	2	4	6	10	16	20	25	32	40	50	63	80
8 x 31	380	20	**CL-16**	■	■	■	■	■	■						
10 x 38	500	100	**CL-20**	■	■	■	■	■	■	■					
14 x 51	500	100	**CL-40**	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■		
22 x 58	500	100	**CL-80**						■	■	■	■	■	■	■

Figura 10.8

Una de la ventajas de los cartuchos fusibles es que están calibrados en amperios. El calibre de un fusible nos indica la intensidad que puede pasar por él sin fundirse. Cuando se supera esta intensidad, el fusible corta el circuito. La rapidez con que lo hace está en función de lo alta que sea la intensidad del fallo, tal como se muestra en las curvas de fusión facilitadas por los fabricantes.

En la Figura 10.9 se dan las curvas de fusión de los cartuchos fusibles mostrados en la Figura 10.8. En el eje (x) se representan los valores de la intensidad. En el eje (y) aparecen representados los tiempos de respuesta del fusible. Para averiguar este tiempo, basta con trazar una recta, perpendicular al eje x, desde la intensidad del fallo hasta la intersección con la curva correspondiente al calibre del fusible.

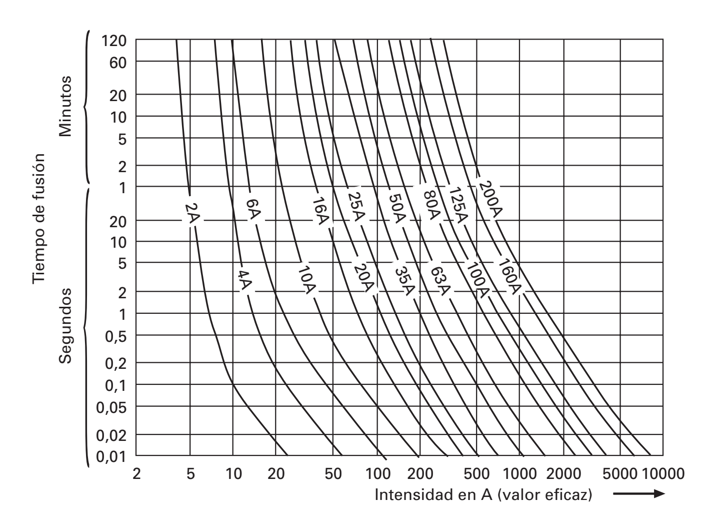


Figura 10.9

Así por ejemplo, se puede apreciar que para una intensidad por el circuito de 25 A: el fusible de 2 A corta el circuito en un tiempo inferior a 0,01 segundos, el fusible de 6 A lo hace en un tiempo de 1 s, el de 10 A en 1 minuto, el de 16 A en más de 120 minutos y el de 25 A no llega nunca a fundirse.

Otra de las características de los cartuchos fusibles calibrados es que son ***selectivos***, lo que significa, tal como hemos podido apreciar en el ejemplo, que siempre funde más rápido aquel fusible que posee el menor calibre. Esto tiene una gran importancia en instalaciones con muchas ramificaciones, ya que ante un cortocircuito se consigue separar rápidamente de la red solamente la zona afectada y, además, en el tiempo más breve posible. Además no se perturba innecesariamente el servicio de energía al resto de los consumidores.

Ejemplos

10.2 La potencia máxima que se prevé para la electrificación de un vivienda es de 5.750 W. Determinar el cartucho fusible necesario para la protección del contador y de la derivación individual si la tensión de suministro es de 230 V.

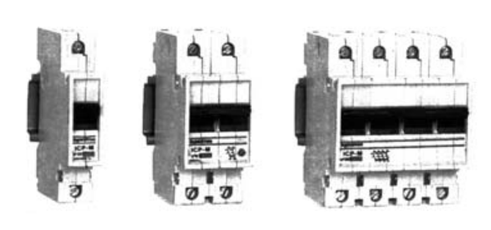
Solución: $I = \frac{P}{V} = \frac{5.750}{230} = 25 \text{ A}$

Si consultamos la gama de cartuchos fusibles comerciales de la Figura 10.8, el calibre del fusible que más se acerca es el de 25 A. Aunque si no queremos fusiones intempesitivas podríamos seleccionar un calibre de 32 o 40 A, siempre y cuando no exista antes una protección de menos calibre.

Los fusibles resultan muy seguros en la protección de cortocircuitos, pero presentan el inconveniente de que son difíciles de reponer. Al fundirse el fusible queda inutilizado, por lo que hay que encontrar otro de las mismas características y realizar la operación de recambio. En muchas ocasiones esta operación resulta engorrosa y si no se hace por un especialista, puede ser hasta peligrosa. Además, los fusibles reaccionan muy lentamente ante las sobrecargas. Por ejemplo, un fusible de 10 amperios tarda 2 minutos en fundirse cuando se le somete a un paso de corriente de sobrecarga de 20 amperios, según las curvas de la Figura 10.9. En cierta aplicaciones este tiempo puede ser suficiente para destruir alguna parte vulnerable de la instalación.

Los interruptores automáticos

Los interruptores automáticos, también conocidos con el nombre de disyuntores, están sustituyendo en muchas aplicaciones a los fusibles, ya que protegen bien contra los cortocircuitos y actúan ante las sobrecargas más rápido y de una forma más selectiva. Así, por ejemplo, en las viviendas se instala un cuadro de mando y protección con varios interruptores automáticos. Cada uno de estos dispositivos protege de las sobrecargas y cortocircuitos a cada uno de los circuitos independientes de la vivienda. En la Figura 10.10 se muestra el aspecto de una gama comercial de interruptores automáticos junto con sus características más relevantes.



ICP - M
Reenganche manual
Poder de corte 6.000 A (excepto 40 A: 4.500 A)
Unesa 6101 y UNE 20 317

Unipolares 220/380 V ~
5 A
7,5 A
10 A
15 A
20 A
25 A
30 A
40 A

Figura 10.10

Así, por ejemplo, en una vivienda con un nivel de electrificaciòn básico, el número de circuitos que hay que proteger es 5: un pequeño interruptor automático de 10 A para la protección del circuito de puntos de iluminación; uno de 16 A para el circuito de tomas de corriente de uso general y frigorífico; uno de 25 A para el circuito de cocina y horno; uno de 20 A para el circuito de lavadora, lavavajillas y termo eléctrico y uno de 16 A para el circuito de tomas de corriente de los cuartos de baño, así como para las bases auxiliares del cuarto de cocina.

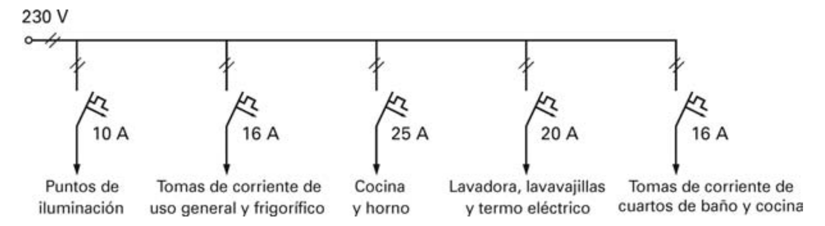


Figura 10.11

Los interruptores automáticos tienen la ventaja de que una vez que han abierto el circuito por sobrecarga o cortocircuito se pueden reponer manualmente con rapidez (una vez que se haya reparado la causa del fallo) y sin necesidad de utilizar recambios, como ocurre en el caso de los fusibles.

Al igual que los fusibles, los interruptores automáticos se fabrican calibrados en amperios. El calibre nos indica los amperios que pueden pasar por el interruptor de una forma permanente sin que éste abra el circuito; superada esta intensidad, el interruptor realiza la apertura del circuito. El tiempo de respuesta dependerá de las veces que se supere la intensidad nominal del mismo. Para intensidades de sobrecargas este tiempo puede ser desde unos pocos segundos a unos pocos minutos; para intensidades de cortocircuito la respuesta es mucho más rápida, del orden de milésimas de segundo.

En la Figura 10.12 se muestra, como ejemplo, el aspecto de las curvas de disparo de los interruptores automáticos.

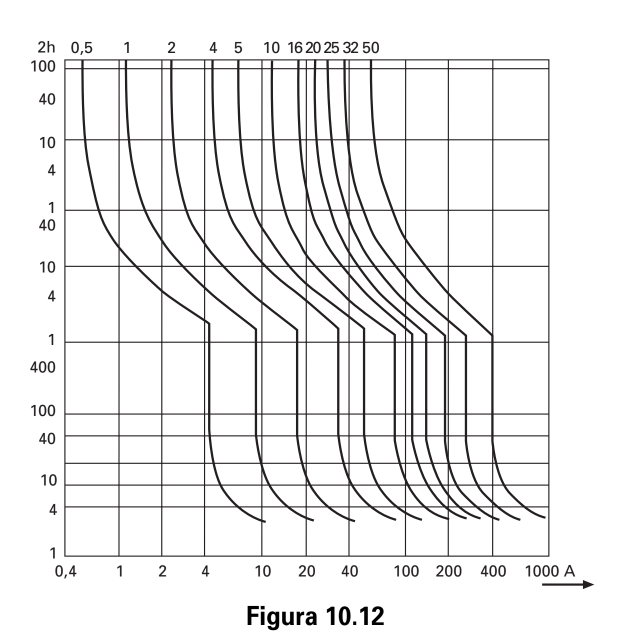


Figura 10.12

Los diferentes calibres de los interruptores automáticos también son selectivos.

Funcionamiento de un interruptor automático

El interruptor automático está compuesto por dos dispositivos de protección diferentes: el relé magnético y el relé térmico. Estos dos elementos están conectados en serie con el circuito a proteger, por lo que toda la corriente pasa por ambos.

- **Relé magnético** (Figura 10.13): Se encarga de la protección de los cortocircuitos. Está constituido básicamente por una bobina de poca resistencia eléctrica. En su interior hay un núcleo de hierro que en posición de reposo se encuentra separado de su centro. Mientras la intensidad de corriente que atraviesa la bobina sea la nominal el interruptor permanece cerrado. Cuando la intensidad crece rápidamente, hasta valores de cortocircuito, la bobina crea un campo magnético suficientemente fuerte como para succionar el núcleo móvil que, a su vez, provoca la apertura del interruptor.

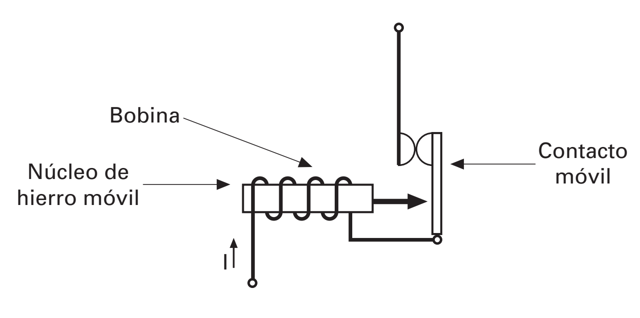


Figura 10.13

- **Relé térmico** (Figura 10.14): Se encarga de la protección de las sobrecargas. La corriente se hace pasar por un elemento bimetálico similar al de un termostato. Cuando la intensidad se eleva a valores considerados de sobrecarga, la lámina bimetálica se calienta por efecto Joule, deformándose y actuando sobre el sistema de apertura del interruptor.

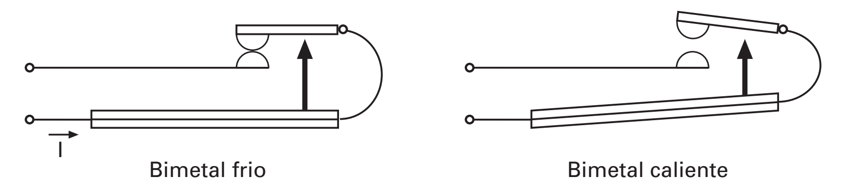


Figura 10.14

En la Figura 10.15 se muestra el aspecto interno de un interruptor automático (también llamado interruptor magnetotérmico), donde se incluye el relé magnético y el térmico conectados en serie.

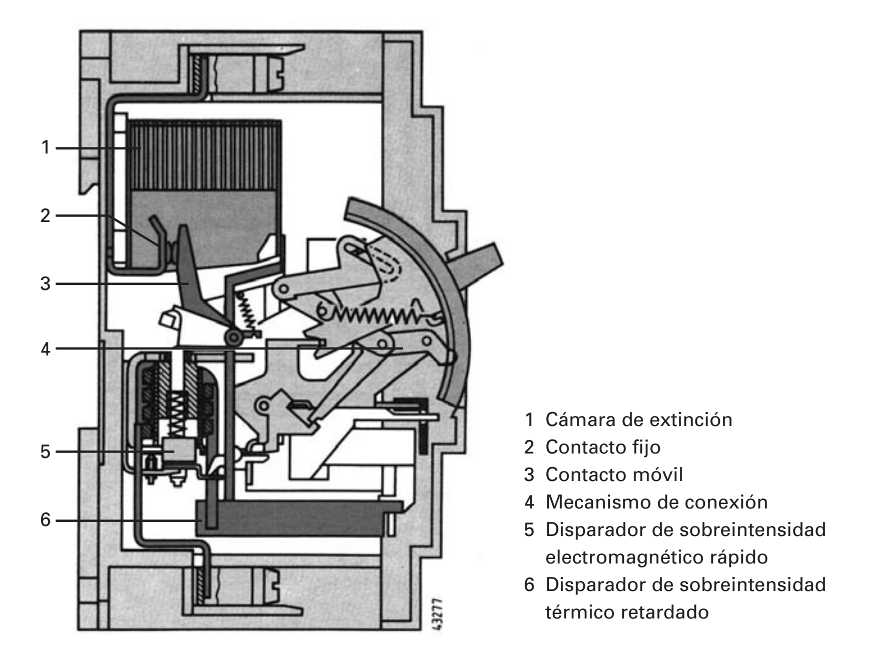


Figura 10.15

El relé térmico garantiza la protección de las sobrecargas mucho mejor que el fusible. Así, por ejemplo un automático de 10 amperios tardaría 15 segundos en cortar el circuito cuando se dé una sobrecarga de 20 amperios, según las curvas de la Figura 10.12. Recordar que el fusible tardaba en esta misma situación 2 minutos.

Los motores pueden producir sobrecargas en su funcionamiento

Cuando un motor trabaja por encima de sus valores nominales se dice que está sometido a una sobrecarga. En otras palabras, cuando nosotros exigimos a un motor que arrastre una carga mecánica más alta que la nominal, éste lo hace a costa de absorber más intensidad de la red. Estas sobrecargas aumentan la temperatura de los bobinados del motor y si no se cortan en un tiempo prudencial destruyen a los mismos (el aislante de los conductores de las bobinas es de una especie de barniz que se destruye con facilidad a una cierta temperatura).

Tomemos, por ejemplo, el motor de un ascensor. Supongamos que el ascensor está preparado para mover a cuatro personas y sin embargo, se montan seis y además pesadas. El motor que mueve el ascensor sigue funcionando, pero lo hace de una

forma forzada y a costa de absorber una mayor intensidad de corriente de la red. La única forma de cortar esta sobrecarga, antes de que el motor se sobrecaliente e incluso llege a quemarse, es incorporando en el circuito un relé térmico especial para la protección de motores (Figura 10.16).

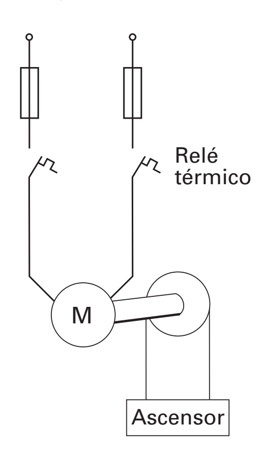


Figura 10.16

Resúmen de Conceptos

Los **elementos de caldeo** se fabrican, por lo general, con hilos de aleaciones metálicas resistivas cubiertos por materiales aislantes que soportan altas temperaturas.

El elemento básico de control de temperatura que suelen poseer la mayoría de los aparatos calefactores es el **termostato**.

Las **lámparas incandescentes** son baratas, fáciles de instalar, poseen un rendimiento luminoso bastante bajo frente a otro tipo de lámparas, su duración no suele superar las 1.000 horas de funcionamiento.

Flujo luminoso emitido por una lámpara: es la cantidad de luz radiada o emitida por una fuente luminosa durante un segundo. Su unidad de medida es el ***lumen (lm)***.

El rendimiento luminoso nos dice los lúmenes que la lámpara emite por cada vatio de potencia eléctrica que absorbe de la red. Se expresa en lm/W.

El cortocircuito se produce cuando se unen accidentalmente las dos partes activas del circuito eléctrico.

Se produce una **sobrecarga** cuando hacemos pasar por un conductor eléctrico más intensidad de corriente que la nominal (intensidad para la que ha sido calculada la línea).

Para la protección contra cortorcircuitos y sobrecargas se emplean los fusibles y los interruptores automáticos.

El **calibre de un fusible** nos indica la intensidad que puede pasar por él sin fundirse. Cuando se supera esta intensidad, el fusible corta el circuito.

Los **interruptores automáticos** tienen la ventaja de que una vez que han abierto el circuito por sobrecarga o cortocircuito se pueden reponer manualmente con rapidez.

El interruptor automático está compuesto por dos dispositivos de protección diferentes: el relé magnético y el relé térmico.

Relé magnético se encarga de la protección de los cortocircuitos y funciona mediante un electroimán que abre el circuito cuando la corriente se eleva rápidamente.

Relé térmico se encarga de la protección de las sobrecargas y funciona mediante un bimetal que abre el circuito cuando el exceso de corriente lo calienta suficientemente.

Actividades

10.1. ¿Cómo se regula, habitualmente, la temperatura de los elementos de caldeo?

a. ❑ Con el termostato.
b. ❑ Conectando resistencias en serie.
c. ❑ Con el termopar.

10.2. Indica las ventajas de la utilización de las lámparas incandescentes.

a. ❑ Su vida útil es muy elevada.
b. ❑ Su rendimiento luminoso es muy bueno.
c. ❑ Son baratas y de fácil instalación.

10.3. Indica las ventajas de la utilización de los interruptores automáticos.

a. ❑ Protegen adecuadamente en cortocircuitos y sobrecargas.
b. ❑ Protegen bien en cortocircuitos y regular en sobrecargas.
c. ❑ La reposición del dispositivo, una vez actuado, es muy compleja.

10.4. Determinar el calibre del cartucho fusible necesario para la protección de cortocircuitos de un horno de 2.000 W a 380 V.

Resultado: 6 A

10.5. Teniendo en cuenta que la tensión de uso doméstico es 230 V, averigua la potencia que se puede conectar en los diferentes circuitos de una vivienda de grado básico sin que actúen los interruptores automáticos.

Resultado: c. puntos de iluminación: 2,3 KW; c. De tomas de corriente uso general y frigorífico: 3,52 KW; c. de cocina y horno: 5,75 KW; c. de lavadora, lavavajillas y termo eléctrico: 4,6 KW; c. de tomas de corriente de baño y cocina: 3,68 KW.



11 Condensadores

El condensador es un dispositivo muy utilizado en la electricidad, sobre todo en aplicaciones de circuitos electrónicos. Pero, ¿qué función cumple el condensador en un circuito? Se puede decir que un condensador es un elemento capaz de almacenar pequeñas cantidades de energía eléctrica para devolverla cuando sea necesaria.

Las aplicaciones de los condensadores son muy amplias. A continuación, se indican algunas de ellas.

- Aprovechando el tiempo que tardan en cargarse se pueden construir circuitos de acción retardada (temporizadores electrónicos, etc.)
- Como ya estudiaremos más adelante, se utilizan como filtros en los rectificadores (dispositivos que convierten la C.A. en C.C.) Con ellos se consigue que la tensión obtenida sea más continua.
- Realización de los circuitos llamados oscilantes y del fenómeno de resonancia. Sintonía en radiodifusión.
- Supresión de parásitos en radiodifusión (ruidos que producen los motores de explosión de los automóviles).
- Corrección del factor de potencia en los sistemas de corriente alterna, que estudiaremos más adelante en el tomo 2 de este Curso de electricidad general.

Funcionamiento de un condensador

Experiencia 11.1

Toma una pila de 4,5 V y conéctala a un condensador electrolítico de 2.200 µF (microfaradios), teniendo cuidado en no equivocarte con las conexiones de los polos (Figura 11.1).

Seguidamente, separa el condensador de la pila y mide la tensión entre sus terminales. Podrás comprobar que el voltímetro indica una tensión de 4,5 V.

A continuación, conecta el condensador a los terminales de un diodo led (diodos que emiten una pequeña radiación luminosa cuando son recorridos por una pequeña intensidad de corriente eléctrica), cuidando respetar las polaridades. Podrás comprobar como el led se enciende un pequeño instante.

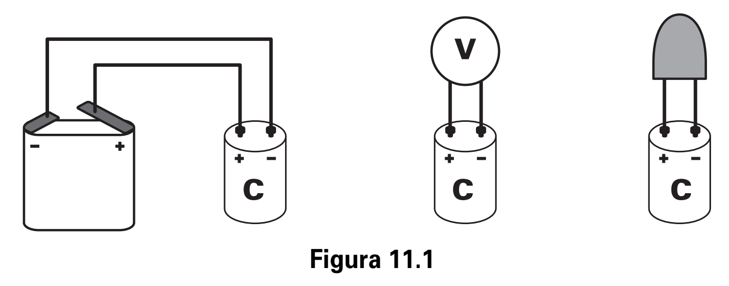


Figura 11.1

La primera parte de la experiencia 11.1 nos demuestra que al conectar la pila con el condensador, éste se carga de energía eléctrica y que la tensión con que ha sido cargado dicho condensador coincide con la tensión de la pila. La segunda parte de esta experiencia hace patente la descarga del condensador a través del diodo led que se enciende durante el pequeño instante que dura la descarga.

Para construir un condensador basta con montar dos placas metálicas conductoras separadas por un material aislante, denominado dieléctrico, como el aire, papel, cerámica, mica, plástico, etc. (Figura 11.2). Normalmente, este dieléctrico se dispone en forma de lámina muy fina para conseguir que las placas metálicas, denominadas armaduras, se encuentren lo más próximas unas de otras.

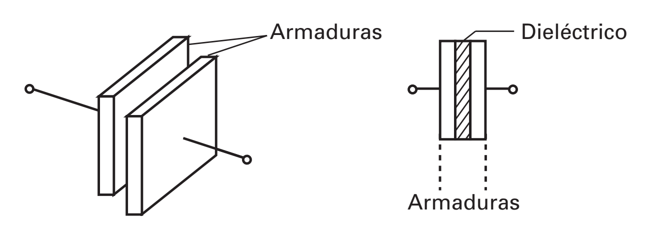


Figura 11.2

El condensador se carga de electricidad según los siguientes fundamentos. Si conectamos las armaduras de un condensador como se indica en el circuito de la Figura 11.3, los electrones en exceso del polo negativo de la pila se dirigirán a la armadura A, cargándola negativamente. A su vez, en la parte interna de la armadura B se producirá una acumulación de cargas positivas por inducción electrostática (recuerda que las placas están muy próximas y, que por tanto, existe una gran atracción entre las cargas eléctricas de ambas armaduras debido a la acción del campo eléctrico). Por otro lado, la carga negativa acumulada en la parte externa de la armadura B es atraída por el polo positivo de la pila, lo que completa la carga del condensador. Una vez que esto suceda, ya no habrá más movimiento de electrones, a no ser que se aumente la tensión de la pila.

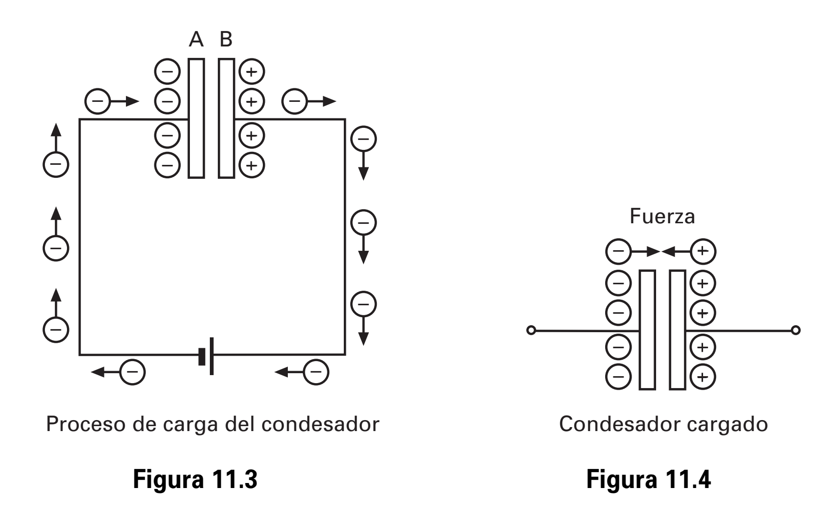


Figura 11.3 **Figura 11.4**

Una vez cargado el condensador, si se le desconecta de la fuente de energía eléctrica, la acumulación de cargas se mantiene gracias a que sigue existiendo la fuerza de atracción entre las armaduras cargadas debido a la diferencia de cargas (Figura 11.4).

¿Qué ocurriría si una vez cargado el condensador aplicásemos al mismo una tensión mayor? Al aumentar la tensión aplicada, aumentan las fuerzas de atracción entre las cargas de las armaduras y por tanto aparece una nueva corriente que carga el condensador hasta alcanzar la nueva tensión aplicada.

¿Qué ocurre si conectamos un condensador en serie en un circuito de corriente continua? Sólo existe corriente eléctrica mientras se carga el condensador, por lo que una vez que se termina la carga se interrumpe el circuito. Por tanto, se puede decir que un condensador no deja pasar la corriente continua.

¿Qué ocurre si conectamos un condensador en serie en un circuito de corriente alterna? El condensador se carga mientras aumente la tensión entre sus placas y se descarga cuando la tensión acumulada es superior a la aplicada. Con lo cual en C.A. el

condensador se carga y descarga en cada mitad del ciclo, haciendo fluir por el circuito corriente en todo momento. En conclusión, un condensador si que permite el paso de la corriente alterna, aunque como ya estudiaremos en el tomo 2 de este Curso de electricidad general, se produce una distorsión o desfase en el tiempo entre la tensión y la corriente.

Capacidad de un condensador

Se denomina capacidad de un condensador a la propiedad que éstos poseen de almacenar mayor o menor cantidad de electricidad.

La cantidad de cargas que puede almacenar un condensador depende, fundamentalmente, de la tensión aplicada entre sus armaduras y de sus características constructivas.

Ya hemos visto, que cuanta más tensión apliquemos entre las placas más cargado queda el condensador. Hay que tener en cuenta que las cargas fluyen a las armaduras debido a la diferencia de cargas o tensión que le proporciona la pila o el generador.

Por otro lado, cuanto mayor sea la superficie del dieléctrico, menor la distancia que separa las armaduras y mejor la calidad del aislante, mayor será la capacidad de almacenar cargas del condensador.

Si llamamos *Q* a la cantidad de carga almacenada por el condensador, *C* a la capacidad del condensador y *V* a la tensión entre las armaduras, resulta que:

$$Q = C \cdot V$$

Q = *Culombios*
C = *Faradios*
V = *Voltios*

La unidad de capacidad es el faradio (F). Se puede decir que un condensador posee la capacidad de un faradio cuando almacena una carga de un culombio al aplicar una tensión de un voltio entre sus placas.

El faradio es una unidad muy grande, por lo que se utilizan submúltiplos, correspondientes a su millonésima parte, milmillonésima parte y billonésima parte, que reciben los nombres de:

- Microfaradio (μF) $1\ \mu F = 1/1.000.000\ F = 0,000001\ F = 10^{-6}\ F$
- Nanofaradio (nF) $1\ \mu F = 1/1.000.000.000\ F = 0,000000001\ F = 10^{-9}\ F$
- Picofaradio (pF) $1\ \mu F = 1/1.000.000.000.000\ F = 0,000000000001\ F = 10^{-12}\ F$

Ejemplos

11.1 Calcular la carga eléctrica almacenada por un condensador de 2.200 μF de capacidad cuando se le conecta a una pila de 4,5 V.

Solución: Lo primero que hacemos es cambiar las unidades:

$$\frac{2.200\ \mu F}{1.000.000} = 0,0022\ F$$

$$Q = C \cdot V = 0,0022 \cdot 4,5 = 0,0099 \text{ culombios}$$

La capacidad de un condensador es mayor cuanto más grande sea la superficie de su armadura, ya que al aumentar la superficie de cargas enfrentadas aumenta la carga del mismo. Por otro lado, la capacidad es menor cuanto mayor sea la distancia que separan a las mismas, ya que las cargas se mantienen sujetas en las armaduras gracias a la atracción que se produce entre ellas por el efecto de las diferencias de cargas. Si la distancia entre éstas fuera grande, apenas habría atracción y la capacidad disminuiría.

Por último, se ha comprobado que, según sea la substancia aislante que se introduce entre las armaduras, la capacidad también varía. Este factor se mide con la constante dieléctrica de la sustancia que se utiliza como aislante.

La expresión matemática que relaciona la capacidad con sus características constructivas es:

$$C = \frac{\varepsilon}{4 \cdot \pi \cdot 9 \cdot 10^9} \cdot \frac{S}{d}$$

S = *Superficie de las armaduras en* m²
d = *Espesor del dieléctrico en* m
ε = *Constante dieléctrica de la substancia aislante*

En la Tabla 11.1 aparecen reflejados los valores de la constante dieléctrica de los materiales más comunes.

Substancia	ε
Aire	1
Petróleo	2
Aceite mineral	2,2 a 2,4
Parafina	1,9 a 2,3
Papel	2 a 2,8
Madera	2 a 8
Ebonita	2,5 a 3,2
Poliester	3
Mica	3 a 6
Porcelana	4,5 a 6
Vidrio	5 a 10
Baquelita	5,6 a 8,5

Tabla 11.1

Ejemplos

11.2 Calcular la capacidad de un condensador si sus placas son de 0,1 m^2, la distancia entre placas de 0,3 mm y el dieléctrico es de **a.** aire, **b.** poliester.

Solución: Para un dieléctrico de aire tenemos que:

$$C = \frac{\varepsilon}{4 \cdot \pi \cdot 9 \cdot 10^{9}} \cdot \frac{S}{d} = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot 9 \cdot 10^{9}} \cdot \frac{0,1}{0,0003} = 2,95 \cdot 10^{9} \text{ F} = 2,95 \text{ nF}$$

$$0,3 \text{ mm} = 0,3/1.000 = 0,0003 \text{ m}$$

Si utilizamos como dieléctrico el poliester obtendremos una capacidad tres veces superior ya que $\varepsilon = 3$.

Constante de tiempo de carga y descarga de un condensador

Se conoce por constante de tiempo al tiempo que invierte el condensador en adquirir el 63% de la carga total. La constante de tiempo de condensador es igual al producto $R \cdot C$. Esta constante es igual de válida para calcular el tiempo de descarga de un condensador. En la teoría un condensador tardaría un tiempo infinito en cargarse o descargase totalmente; en la práctica se puede comprobar que transcurrido un tiempo igual a *cinco constantes de tiempo* se puede dar por terminado prácticamente el 100 % del proceso de carga o descarga del condensador.

Ejemplos

11.3 Determinar la constante de tiempo del condensador del circuito de la Figura 11.5. Calcular también el tiempo de carga completa del condensador.

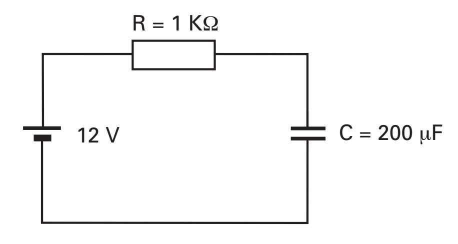


Figura 11.5

Solución: La constante de tiempo será igual a:

$$\tau = R \cdot C = 1.000 \cdot 200 \cdot 10^{-6} = 0,2 \text{ segundos}$$

El tiempo total de carga se dará para cinco constantes de tiempo:

$$t = 5 \cdot \tau = 5 \cdot 0,2 = 1 \text{ segundo}$$

Tensión de trabajo y de perforación del dieléctrico

Al igual que indicábamos que los aislantes poseen un poder determinado de aislamiento, fijado por la rigidez dieléctrica. Si un condensador es sometido a una tensión excesiva, el dieléctrico no podrá soportarlo y se perforará. Téngase en cuenta que las armaduras están muy próximas y un aumento de la tensión produce, a su vez, un aumento de atracción entre las cargas de ambas armaduras que hace fácil el paso de la corriente eléctrica por el aislante.

De aquí surge el concepto de **tensión de perforación**, que se define como la tensión máxima que es capaz de soportar un condensador sin que se destruya su dieléctrico.

Por supuesto, no es recomendable que la tensión a la que trabaja un condensador sea mayor que la de perforación. De aquí nace el concepto de **tensión de trabajo**, que se define como la tensión a la que puede funcionar un condensador de una forma permanente sin sufrir daños. Esta tensión es la que se encuentra indicada en la superficie de los condensadores.

La tensión de trabajo de un condensador tiene una gran incidencia en las dimensiones de éstos. Cuanta más tensión de trabajo posea el condensador, mayor tiene que ser el espesor del dieléctrico, lo que hace que haya que aumentar, en estos casos, la superficie de las placas para conseguir una capacidad considerable. De tal forma, que podremos encontrar condensadores de baja tensión y elevada capacidad que presenten un tamaño similar al de otros de elevada tensión y pequeña capacidad.

Tipos de condensadores

Existe una amplia gama de diferentes tipos de condensadores en el mercado, de los que conviene conocer sus principales características con objeto de poder utilizarlos para la aplicación más idónea.

Al igual que las resistencias, existen condensadores variables a los que se les puede modificar su valor capacitivo. Estudiaremos aquí los condensadores fijos que son los de más extendida aplicación.

- **Condensadores de plástico** (Figura 11.6). Actualmente son muy utilizados. Estos condensadores utilizan normalmente como dieléctrico el poliester y el estiroflex. Su utilización tiene la ventaja de conseguir capacidades relativamente elevadas a tensiones que lleguen hasta 1.000 V y capacidades desde un nanofaradio hasta algunos microfaradios.

- **Condensadores cerámicos** (Figura 11.7). Estos condensadores utilizan como dieléctrico compuestos cerámicos de una constante dieléctrica muy elevada. Con ellos se consiguen valores desde los pocos picofaradios hasta los 100 nF. Soportan poca tensión.

- **Condensadores electrolíticos** (Figura 11.8). Estos condensadores se diferencian bastante del resto por sus características constructivas. Están constituidos por una lámina de aluminio y otra de plomo sumergidas en una solución de cloruro de amonio (electrólito). Son condensadores con los se consiguen capacidades elevadas en un volumen reducido (desde 1µF hasta decenas de miles de microfaradios). Una de las características que diferencia a los condensadores electrolíticos de los demás es que tienen polaridad, es decir, no pueden invertirse las conexiones indicadas en la superficie del componente, ni, por tanto, aplicarse corriente alterna. En caso contrario, el condensador se perfora. En la actualidad se fabrican condensadores electrolíticos de tántalo que reducen el tamaño para la misma capacidad que uno de aluminio. Además, el electrólito suele ser seco.

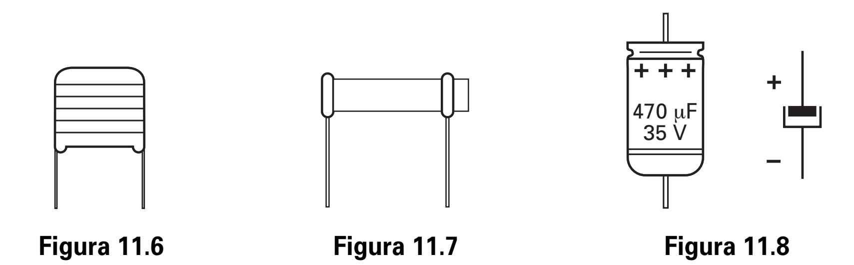


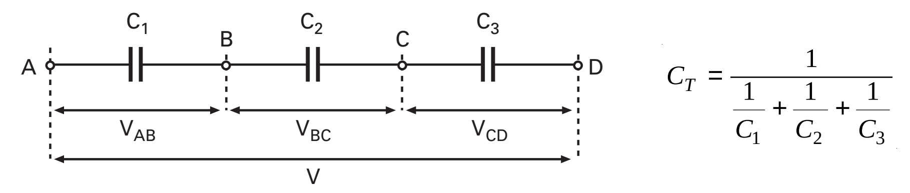
Figura 11.6 Figura 11.7 Figura 11.8

Asociación de condensadores

En el caso de que un condensador no disponga de la capacidad o tensión de trabajo adecuada para nuestras necesidades, se pueden acoplar entre sí en serie o paralelo y así conseguir las características deseadas.

Asociación de condensadores en serie

La tensión aplicada al conjunto se reparte entre los terminales de cada uno de los condensadores (Figura 11.9), de tal forma que se cumple la relación: $V = V_{AB} + V_{BC} + V_{CD}$. Con esta disposición cada uno de los condensadores trabaja a una tensión más baja que la aplicada al conjunto de los mismos. Sin embargo la capacidad total obtenida es inferior a la de cualquiera de ellos. Se cumple que:



$$C_T = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}}$$

Figura 11.9

Ejemplos

11.4 Se conectan en serie tres condensadores iguales de 6 µF a una batería de 100 V. Calcular la capacidad conseguida por el conjunto, así como la tensión que soporta cada condensador.

Solución:

$$C_T = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}} = \frac{1}{\frac{1}{6} + \frac{1}{6} + \frac{1}{6}} = 2\ \mu\text{F}$$

Dado que todos los condensadores poseen la misma capacidad la tensión total se repartirá igualmente entre ellos. De esta manera la tensión que soporta cada condensador es 100/3 = 33,33 voltios.

11.5 Se dispone de un número ilimitado de condensadores de 100 µF de capacidad y 50 V de tensión de trabajo. ¿Cuántos condensadores de este tipo sería necesario acoplar para conseguir un equivalente con una tensión de trabajo de 200 V y una capacidad de 25 µF? ¿Cómo hay que acoplarlos?

Solución: Al acoplar cuatro condensadores 100 µF en serie se consigue una capacidad equivalente igual a:

$$C_T = \frac{100}{4} = 25\ \mu\text{F}$$

Al ser iguales los condensadores la tensión se reparte por igual en cada condensador:

$$V = \frac{200}{4} = 50\ V$$

Con esta solución hemos conseguido conectar a una tensión de 200 V condensadores que sólo soportan 50 V. Por supuesto se ha hecho a costa de reducir la capacidad de 100 μF a 25 μF.

Asociación de condensadores en paralelo

En este acoplamiento, la tensión a la que quedan sometidos todos los condensadores es la misma y coincide con la aplicada al conjunto (Figura 11.10).

La capacidad aumenta cuando se les conecta en paralelo. Se cumple que:

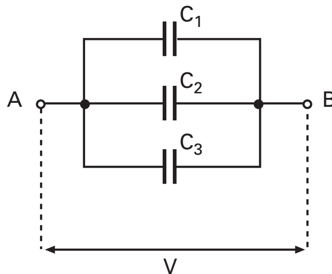


Figura 11.10

$$C_T = C_1 + C_2 + C_3$$

Ejemplos

11.6 Se acoplan en paralelo tres condensadores de 4 μF, 8 μF y 12 μF a una fuente de alimentación de 100 V en C.C. Averiguar la capacidad del conjunto, así como la tensión a la que trabajan los condensadores.

Solución: La capacidad total conseguida es,

$$C_T = C_1 + C_2 + C_3 = \ldots\ldots = 24\ \mu\text{F}$$

La tensión de trabajo de los condensadores es igual para todos: 100 V.

Con este montaje hemos conseguido aumentar la capacidad mientras que la tensión de trabajo permanece invariable.

11.7 Determinar cuántos condensadores de 20 μF de capacidad y 5 V de tensión de trabajo hay que conectar para conseguir un equivalente de 20 μF /10 V.

Solución: Al conectar dos condensadores en serie se consigue aumentar la tensión hasta 10 V a costa de reducir la capacidad a 10 μF. Si ahora conectamos otra rama de dos condensadores en serie que, a su vez, estén

conectados en paralelo con la otra rama conseguiremos aumentar la capacidad hasta los 20 µF sin modificar la tensión, tal como se indica en la Figura 11.11.

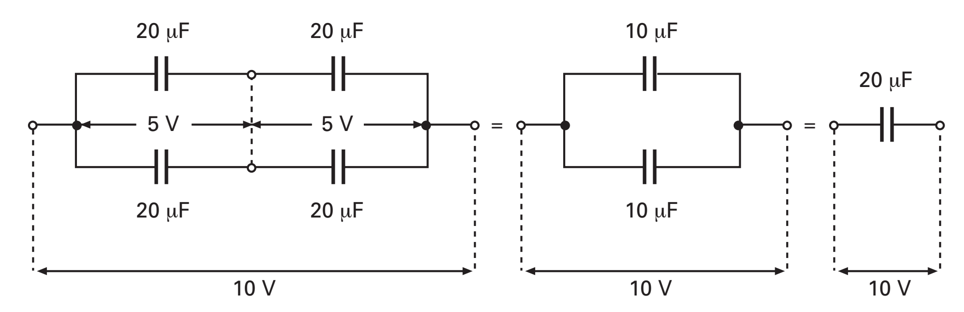


Figura 11.11

Resúmen de Conceptos

Un condensador es un elemento capaz de almacenar pequeñas cantidades de energía eléctrica.

Para construir un condensador basta con montar dos placas metálicas conductoras separadas por un material aislante, denominado dieléctrico.

Un condensador no permite el paso de una corriente continua, pero sí que lo hace si la corriente es alterna.

La **capacidad** de un condensador es la propiedad que éstos poseen de almacenar mayor o menor cantidad de electricidad.

$$Q = C \cdot V$$

Q = *Culombios*
C = *Faradios*
V = *Voltios*

$1\ \mu F = 10^{-6}\ F$ $\quad$ $1\ nF = 10^{-9}\ F$ $\quad$ $1\ pF = 10^{-12}\ F$

$$C = \frac{\varepsilon}{4 \cdot \pi \cdot 9 \cdot 10^{9}} \cdot \frac{S}{d}$$

S = *Superficie de las armaduras en* m²
d = *Espesor del dieléctrico en* m
ε = *Constante dieléctrica de la substancia aislante*

Se conoce por **constante de tiempo** al tiempo que invierte el condensador en adquirir el 63 % de la carga total: $\tau = R \cdot C$

La **tensión de perforación** es la tensión máxima que es capaz de soportar un condensador sin que se destruya su dieléctrico.

La **tensión de trabajo** es la tensión a la que puede funcionar un condensador de una forma permanente sin sufrir daños.

Los condensadores **electrolíticos** tienen polaridad, por lo que no sirven para C.A.

Capacidad equivalente de condensadores acoplados en **paralelo**.

$$C_T = C_1 + C_2 + C_3$$

Capacidad equivalente de condensadores acoplados en **serie**.

$$C_T = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}}$$

Actividades

11.1. ¿Cuáles son las características que hay que conocer para definir un condensador concreto?

- **a.** ❑ Capacidad y potencia.
- **b.** ❑ Capacidad, tipo de dieléctrico, separación entre placas.
- **c.** ❑ Tipo, capacidad y tensión de trabajo.

11.2. ¿Qué ocurre si en un circuito de una lámpara alimentada por una fuente de alimentación de C.C. intercalamos en serie un condensador?

- **a.** ❑ La lámpara se enciende durante un pequeño tiempo y luego se apaga totalmente.
- **b.** ❑ La lámpara se enciende normalmente.
- **c.** ❑ La lámpara se enciende y se apaga constantemente.

11.3. ¿Qué ventajas conlleva el uso de condensadores electrolíticos?

- **a.** ❑ Soportan tensiones de trabajo fuertes.
- **b.** ❑ Se consiguen altas capacidades y se pueden emplear en C.A.
- **c.** ❑ Se consiguen altas capacidades.

11.4. ¿Qué ventajas aporta la conexión de condensadores en serie?

- **a.** ❑ Se aumenta la capacidad del conjunto de condensadores acoplados.
- **b.** ❑ Se consigue aumentar la tensión de trabajo del conjunto de condensadores acoplados.
- **c.** ❑ Se aumenta la tensión y la capacidad.

11.5. ¿Qué puede ocurrir cuándo se supera la tensión de trabajo de un condensador?

- **a.** ❑ El condensador se calienta.
- **b.** ❑ El condensador cambia la capacidad nominal.
- **c.** ❑ El condensador se puede perforar y destruir.

11.6. Calcular la carga eléctrica que almacena un condensador de 1.000 μF cuando es sometido a las siguientes tensiones: 4 V, 20 V y 100 V, respectivamente.

Resultado: 0,004 C; 0,02 C; 0,1 C.

11.7. ¿Qué espesor deberá tener el dieléctrico de un condensador plano de porcelana (ε = 5,5) para conseguir una capacidad de 1 nF, si posee unas armaduras con unas dimensiones de 50 cm x 2 cm?

Resultado: 0,49 mm.

11.8. Determinar la constante de tiempo y el tiempo que invierte un condensador de 100 µF, cargado con 24 V, en descargarse totalmente a través de una resistencia de 100 Ω.

Resultado: τ = 0,01 s, t = 0,05 s

11.9. Se dispone de un número ilimitado de condensadores de 10 µF de capacidad y 5 V de tensión de trabajo. ¿Cuántos condensadores de este tipo sería necesario acoplar para conseguir un equivalente con una tensión de trabajo de 20 V y una capacidad de 2,5 µF? ¿Cómo hay que acoplarlos?

a. ❏ 4 condensadores en paralelo.

b. ❏ 4 condensadores en serie.

11.10. ¿Y para conseguir un equivalente con una capacidad de 5 µF y una tensión de trabajo de 20 V?

a. ❏ 8 condensadores agrupados en 2 ramas de 4 condensadores en paralelo. Las ramas se conectan en serie.

b. ❏ 16 condensadores agrupados en 4 ramas de 4 condensadores en serie. Las ramas se conectan en paralelo.

11.11. ¿Y para conseguir un equivalente con la misma capacidad (20 µF) y una tensión de trabajo de 10 V?

a. ❏ 9 condensadores agrupados en 3 ramas de 3 condensadores en serie. Las ramas se conectan entre sí en serie.

b. ❏ 9 condensadores agrupados en 3 ramas de 3 condensadores en serie. Las ramas se conectan entre sí en paralelo.



Efecto químico de la corriente eléctrica

Estudiaremos ahora los fenómenos que se dan en las disoluciones químicas en relación con la corriente eléctrica. Ya tuvimos ocasión de comprobar cómo al introducir dos metales diferentes en una disolución de ácido sulfúrico se producía una pequeña f.e.m., que se correspondía con el principio de funcionamiento de pilas y acumuladores. Pues bien, cuando aplicamos corriente a una disolución química, aparecen fenómenos, como la electrólisis, que pueden ser de gran utilidad para múltiples aplicaciones prácticas.

Electrólisis

Experiencia 12.1

Llena un pequeño recipiente con agua lo más pura posible (agua destilada), introduce un par de electrodos conectados a una fuente de alimentación de C.C. (Figura 12.1). Mediante un amperímetro conectado en serie comprueba la corriente del circuito. Se podrá comprobar cómo en este caso no pasa corriente.

Ahora diluye en el agua, unas gotas de ácido sulfúrico o de ácido clorídico, o unas sales. Podrás comprobar que ahora sí hay corriente y que en ambos electrodos aparecen unas burbujas.

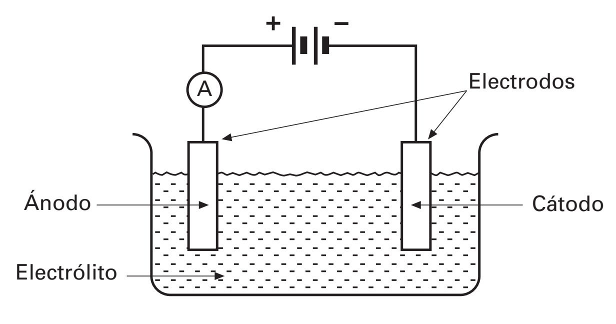


Figura 12.1

De la experiencia 12.1 se deduce que el agua pura tiene una resistencia eléctrica muy elevada y por tanto no conduce la corriente eléctrica. Sin embargo al añadir ácidos o sales al agua, hace que la disolución sea conductora de la electricidad.

A los líquidos que permiten el paso de la corriente eléctrica se les denomina **electrólitos**.

A los electrodos que están sumergidos en el electrólito se les conoce por el nombre de **ánodo** cuando están conectados al positivo y **cátodo** al negativo.

Si hiciésemos pasar corriente por un electrólito durante un tiempo se podría observar perfectamente que el ánodo disminuye de peso, mientras que el cátodo aumenta. También se puede apreciar que el burbujeo observado pertenece a la descomposición del agua en hidrógeno y oxígeno. A estos fenómenos de descomposición que se dan en los electrólitos cuando son recorridos por una corriente eléctrica se les denomina **electrólisis**.

Veamos como ocurre el fenómeno de la electrólisis.

Tanto las moléculas de los ácidos, como las de las sales y bases, se dividen o disocian al entrar en contacto con el agua y lo hacen adquiriendo una cierta carga eléctrica. A estas partículas cargadas eléctricamente se las denomina **iones**. Dependiendo de la polaridad de la carga adquirida, tendremos entonces iones positivos e iones negativos. Así, por ejemplo, la sal marina (cloruro sódico) Cl Na se disocia con ion negativo de cloro Cl^- y un ion positivo de sodio Na^+.

Al aplicar una tensión continua entre los electrodos, los iones con carga negativa del electrólito son atraídos por el polo positivo o ánodo y los iones positivos por el polo negativo o cátodo.

Al alcanzar un ion negativo el electrodo positivo, se neutraliza su carga eléctrica. Lo mismo ocurre con los iones positivos en el electrodo negativo. Además se producen diferentes fenómenos de recombinación entre los iones y los electrodos. Así, por ejemplo, si se trata de un ion positivo de hidrógeno, al llegar al cátodo se convierte en

hidrógeno gaseoso, desprendiéndose en forma de burbujas. En el caso de iones positivos de carácter metálico, se depositan en el cátodo, recubriéndolo con una capa de metal.

El transporte de materia que se produce en los electrólitos al ser atravesados por una corriente eléctrica tiene multitud de aplicaciones, como son: la descomposición del agua, refinado de metales, separación de metales por electrólisis, anodizado, obtención de metales, recubrimientos galvánicos consistentes en depositar un fino baño de oro, plata, níquel, cromo, estaño, zinc. etc, en un cuerpo conductor.

Ley de Faraday

Faraday estudio los fenómenos que se daban en la electrólisis, llegando a la siguiente conclusión:

☞ “La masa de metal que se acumula en un electrodo negativo o cátodo es proporcional a la intensidad de la corriente y al tiempo que recorre el electrólito. Es decir, a la cantidad de electricidad.”

Esta masa varía de una substancia a otra, así por ejemplo, una corriente de 1 A disocia en 1 segundo 1,118 mg de plata. Si la substancia fuese níquel, para 1 A y 1 s se disocia sólo 0,299 mg. A este valor se le conoce por **equivalente electroquímico**, y se le define como la cantidad de substancia que se disocia en un electrólito cuando es atravesado por una corriente de un amperio durante un tiempo de un segundo.

De esta manera, podemos escribir la expresión que define la ley de Faraday así:

$$m = I \cdot t \cdot c$$

m = *masa en* mg
I = *corriente en* A
t = *tiempo en* s
c = *equivalente electroquímico en* mg/A s

En la Tabla 12.1 se indica el equivalente electroquímico de algunas substancias.

Substancia	c (mg/A s)	Substancia	c (mg/A s)
Aluminio	0,094	Níquel	0,299
Cinc	0,338	Oro	0,681
Cromo	0,18	Plata	1,118
Cobre	0,329	Platino	0,505
Mercurio	1,036	Plomo	1,072

Tabla 12.1

Ejemplos

12.1 Determinar la masa de cromo que se disocia en un electrólito, si fluye por el mismo una corriente de 2 amperios durante 5 minutos.

Solución: $m = I \cdot t \cdot c = 2 \cdot (5 \cdot 60) \cdot 0{,}18 = 108\ \text{mg}$

Descomposición del agua por electrólisis

En el caso de utilizar como electrólito ácido sulfúrico (H_2SO_4) diluido con agua, como ya indicamos, el electrodo negativo o cátodo atrae hacia si los iones positivos de hidrógeno (H_2^+), formando hidrógeno gaseoso. A su vez, aparecen iones negativos de oxígeno (O^-) que son arrastrados hacia el electrodo positivo formándose oxígeno gaseoso. De esta forma se consigue separar los componentes del agua, convirtiéndose en oxígeno e hidrógeno.

Se dispone en cada electrodo de una probeta, tal como se muestra en la Figura 12.2, se pueden recoger ambos gases por separado:

- En el ánodo se recoge oxígeno.
- En el cátodo se recoge hidrógeno en doble cantidad que oxígeno.

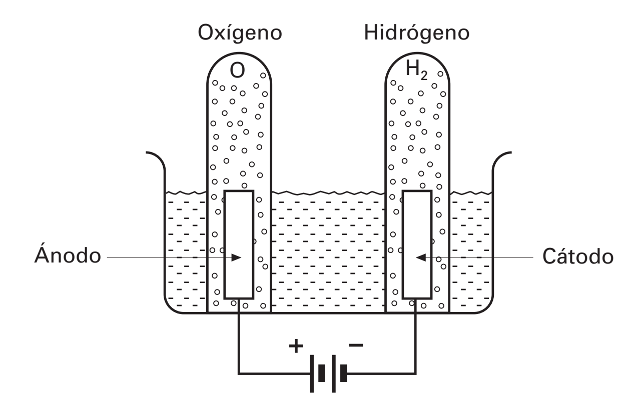


Figura 12.2

Existen multitud de aplicaciones de la descomposición del agua. Por ejemplo, si juntamos el hidrógeno con el oxígeno y acercamos una llama, la mezcla arde y entra en combustión, emitiendo vapor de agua como gas residual.

Recubrimientos galvánicos

Esta aplicación de la electrólisis consigue la realización de recubrimientos o baños metálicos.

Este procedimiento consiste en conectar eléctricamente el objeto a recubrir en el electrodo negativo. En el electrólito se disuelven las sales apropiadas con el metal que deseamos que se deposite en el objeto. Como electrodo positivo se utiliza una placa del mismo metal a recubrir.

Así, por ejemplo, si queremos realizar un recubrimiento o baño de plata en un objeto metálico, podemos utilizar nitrato de plata diluido como electrólito. Los átomos metálicos de plata se disocian como un ion positivo, que al paso de la corriente son arrastrados hacia el electrodo negativo donde se encuentra el objeto a recubrir. Allí acaban depositándose y formando una fina capa de plata (Figura 12.3). De esta manera se pueden hacer baños de oro, níquel, cromo, zinc, etc.

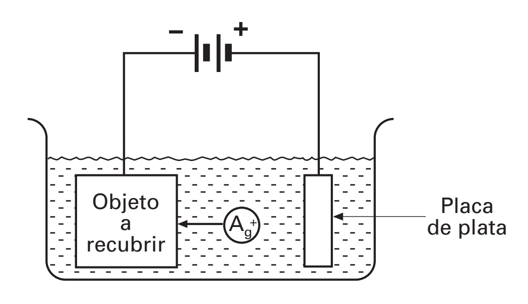


Figura 12.3

Galvanoplastia

Consiste en recubrir metálicamente objetos no conductores. Para ello, se construye el objeto con yeso, cera, plástico, etc. Después se recubre la superficie con un material conductor, como por ejemplo grafito. Una vez hecho esto, se opera como en los recubrimientos galvánicos, consiguiendo que el metal quede fijado en el objeto gracias a la capa conductora de grafito.

Resúmen de Conceptos

A los líquidos que permiten el paso de la corriente eléctrica se les denomina **electrólitos**.

A los electrodos que están sumergidos en el electrólito se les conoce por el nombre de **ánodo** cuando están conectados al positivo y **cátodo** al negativo.

Al aplicar una tensión continua entre los electrodos, los iones con carga positiva del electrólito son atraídos por el cátodo y los iones negativos por el polo ánodo, produciéndose un transporte de materia que tiene múltiples aplicaciones prácticas.

Ley de Faraday: La masa de metal que se acumula en el cátodo es proporcional a la intensidad de la corriente y al tiempo que recorren en el electrólito.

Equivalente electroquímico: Cantidad de substancia que se disocia en un electrólito cuando es atravesado por una corriente de un amperio durante un tiempo de un segundo.

$$m = I \cdot t \cdot c$$

m = *masa en* mg
I = *corriente en* A
t = *tiempo en* s
c = *equivalente electroquímico en* mg/A s

En la descomposición del agua por electrólisis: en el ánodo se recoge oxígeno y en el cátodo se recoge hidrógeno en doble cantidad que oxígeno.

En los recubrimientos galvánicos, gracias a la electrólisis, se consigue la realización de recubrimientos o baños metálicos.

La Galvanoplastia consiste en recubrir metálicamente objetos no conductores.

Actividades

12.1. ¿Cómo se les denomina a los electrodos de un proceso electrolítico?

a. ❏ Cátodo al positivo y ánodo al negativo.

b. ❏ Ánodo al positivo y cátodo al negativo.

12.2. Al hacer pasar una corriente por un electrólito:

a. ❏ Los iones metálicos positivos se dirigen hacia el cátodo.

b. ❏ Un ion negativo de oxígeno se dirige hacia el ánodo.

c. ❏ Las moléculas del electrólito se disocian.

12.3. La ley de Faraday nos indica:

a. ❏ Que la masa disociada en un electrólito es proporcional a la cantidad de electricidad.

b. ❏ Que la masa disociada en un electrólito depende exclusivamente de la corriente y del tiempo.

c. ❏ Que la masa disociada en un electrólito depende de la cantidad de electricidad y del equivalente electroquímico.

12.4. Los recubrimientos galvánicos consisten en:

a. ❏ Disociar el agua mediante electrólisis.

b. ❏ Depositar un metal en un objeto conductor mediante electrólisis.

12.5. Determinar el tiempo que habrá que hacer pasar por una disolución de nitrato de plata una corriente de 10 A para disociar 100 gramos de plata.

Resultado: 2 horas y 29 minutos.



Pilas eléctricas

Las pilas eléctricas son elementos que convierten la energía que se produce en una reacción química en energía eléctrica (Figura 13.1). Sus aplicaciones son ya de sobra conocidas por todos nosotros, y se reducen fundamentalmente a la alimentación de pequeños aparatos portátiles. El tipo de corriente que produce una pila es de corriente continua. El principal inconveniente que nos encontramos con las pilas es que una vez agotado su combustible químico, se vuelven inservibles y hay que desecharlas. Al contrario, los acumuladores funcionan de una forma similar al de las pilas, con la ventaja de que se pueden recargar multitud de veces tan sólo con conectarlos durante un tiempo a una fuente de tensión continua (cargador de acumuladores).



Figura 13.1

Principios generales de funcionamiento de las pilas eléctricas

Para construir un elemento básico de una pila, basta con introducir dos electrodos de diferentes metales en un electrólito. Al hacer esto aparece entre los electrodos una tensión eléctrica que depende de la naturaleza de los metales utilizados como electrodos y de la composición y concentración del electrólito.

El funcionamiento de una pila básica es así (Figura 13.2): el electrólito ataca al metal de los electrodos y los disuelve, pasando a la disolución como iones metálicos. Como ya tuvimos ocasión de comprobar, los iones metálicos adquieren siempre carga positiva (átomos metálicos con defecto de electrones), por lo que los electrodos, de donde son arrancados los átomos que pasan a la disolución, siempre se quedan con un exceso de electrones, es decir con carga negativa.

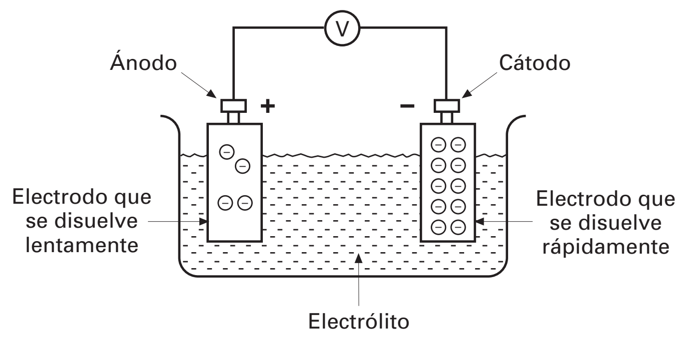


Figura 13.2

Dado que los dos electrodos son de diferente naturaleza, siempre existe uno de ellos que se disuelve más rápidamente que el otro, dando lugar a una carga más negativa en el electrodo que se disuelve en menos tiempo que en el que más lo hace lentamente.

El resultado es que aparece una diferencia de potencial ente ambos electrodos que puede ser utilizada para alimentar un receptor eléctrico.

Experiencia 13.1

Vierte en un recipiente agua con unas gotas de ácido sulfúrico, ahora introduce dos electrodos metálicos de diferente naturaleza y comprueba la diferencia de potencial que aparece entre los electrodos. Repite el experimento utilizando dos electrodos del mismo metal. Ahora realiza diferentes combinaciones de metales en los electrodos, como por ejemplo, cobre, cinc, carbón, plomo, hierro, etc.

En la experiencia 13.1 se puede comprobar que cuando los electrodos son iguales, no aparece diferencia de potencial entre los mismos. Al utilizar electrodos de diferente material aparece tensión, pero ésta varía según la combinación de los materiales utilizados.

Los electrodos se seleccionan según la serie de Volta, que nos da una relación escalonada de materiales con la tensión que aparece respecto a un electrodo patrón de hidrógeno y utilizando como electrólito una solución de sales en una concentración constante, tal como se expone a continuación:

- Como electrodos positivos:

  Oro (+1,5 V); platino (+0,86 V); plata (+0,8 V); mercurio (+0,79 V); carbón (+0,74 V); cobre (+0,34 V); bismuto (+0,28 V); antimonio (+0,14 V).

- Como electrodos negativos:

  Plomo (-0,13 V); estaño (-0,14 V); níquel (-0,23 V); cobalto (-0,29 V); cadmio (-0,4 V); hierro (-0,44 V); cromo (-0,56 V); cinc (-0,76 V); manganeso (-1,1 V); aluminio (-1,67 V); magnesio (-2,4 V); sodio (-2,71 V); potasio (-2,92 V); litio (-2,96 V).

Cuanto más distantes se encuentren los materiales utilizados como electrodos en una pila de la serie de Volta más diferencia de potencial podremos conseguir entre los mismos.

Ejemplos

13.1 Determinar la tensión que aparece en una pila si se utiliza como electrodo positivo el carbón y como negativo el cinc sumergidos en ácido sulfúrico diluido:

Solución: En el carbón aparece un potencial positivo de + 0,74 V respecto del hidrógeno y en el de cinc de - 0,76 V. La tensión que los separa será entonces:

$$0{,}74 + 0{,}76 = 1{,}5 \text{ V}$$

¿y para un electrodo de cobre y otro de cinc?: . . . . . 1,1 V

Conviene recordar que estos valores son sólo válidos en referencia a un elemento patrón, y que la tensión depende también del tipo de electrólito y de su concentración.

Polarización de una pila

Experiencia 13.2

Vierte en un recipiente agua con unas gotas de ácido sulfúrico, ahora introduce dos electrodos metálicos de cinc y de cobre. Conecta a ambos electrodos una lámpara incandescente de 1 V.

Podrás observar como la lámpara se enciende nada más conectarla, para luego ir perdiendo luminosidad y apagarse. Si observas el electrodo positivo formado por la barra de cobre comprobarás la formación de una gran cantidad de burbujas. Si ahora desconectamos la lámpara y dejamos que las burbujas se disipen, podremos volver a conectar la lámpara con éxito.

Lo que ha ocurrido en la experiencia 13.2 es que, debido a la reacción química se producen en el electrólito iones de hidrógeno que son arrastrados por la corriente eléctrica hasta el electrodo positivo. Este hidrógeno inunda en forma de burbujas el electrodo, formando una capa casi aislante que impide el paso de corriente (Figura 13.3). Cuando se deja reposar la pila, el hidrógeno tiende a abandonar el electrodo positivo, pudiendo volver otra vez a funcionar.

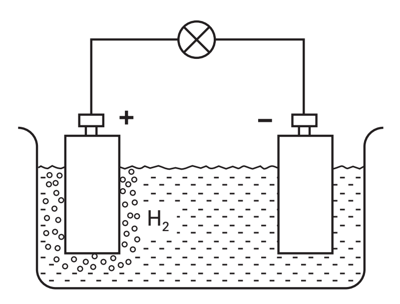


Figura 13.3

Como es lógico, lo importante es conseguir que la pila proporcione corriente de una forma constante. Para conseguirlo, es necesario disponer alrededor del electrodo positivo de una sustancia que absorba el hidrógeno según se va originando. A estas sustancias se las llama despolarizantes. Ejemplos de sustancias despolarizantes son los llamados agentes oxidantes como la pirolusita (bióxido de manganeso $Mn\ O_2$) y el óxido de mercurio (Hg O). El oxígeno de estos compuestos se combina con el hidrógeno que rodea el ánodo dando como resultado agua ($H_2\ O$).

Características de las pilas

Las características más fundamentales de las pilas son las siguientes:

- ***Fuerza electromotriz*:** La f.e.m. de la pila es la que se mide con un voltímetro de alta resistencia conectado entre los electrodos de la misma, evitando así que la corriente en la medida sea lo más pequeña posible y así evitar errores en la medida por caída de tensión en la resistencia interna de la pila. La f.e.m. de una pila depende fundamentalemente de los electrodos, electrólito y despolarizador. Este valor varía un poco con la temperatura y con la concentración del electrólito. Para corrientes de suministro muy elevadas, la f.e.m. podría disminuir debido al efecto de la polarización.
- ***Capacidad:*** Cantidad total de electricidad que puede suministrar la pila hasta agotarse. La capacidad de una pila dependen de los elementos que la constituyen, así como de sus dimensiones y se mide en amperios-hora**.**
- ***Resistencia interna:*** Este valor depende de las dimensiones de la pila y de la concentración y temperatura del electrólito, disminuyendo la resistencia interna al aumentar el tamaño de la pila**.** Este valor suele ser del orden de algunas décimas de ohmio.
- ***Corriente de régimen nominal:*** Corriente máxima que puede suministrar una pila sin que los efectos de la polarización causen una merma importante de su f.e.m.

Tipos de pilas eléctricas

Se pueden construir pilas combinando diferentes metales en sus electrodos y utilizando electrólitos variados. Así se construyen las pilas: Daniell, Volta, Leclanche, pilas secas tipo Leclanché, pilas secas de magnesio, pilas de óxido de mercurio, pila patrón de weston, pilas de oxígeno, pilas alcalinas de pirolusita, pilas en forma de botón, pilas de combustible, y muchas otras más. Las pilas pueden constituirse a partir de un electrólito líquido, aunque en la actualidad la tendencia es a utilizar electrólitos inmovilizados mediante materias absorbentes (pilas secas) que confieren a las pilas mejores prestaciones. Estudiaremos a continuación una pequeña muestra de los diferentes tipos de pilas.

Pila Leclanché

En la pila Leclanché el electrodo positivo es de carbón y se introduce en el centro de un depósito (Figura 13.4). Como elemento despolarizante se emplea la pirolusita

dispuesta alrededor de la barra de carbón y dentro de una especie de saco o recipiente poroso. Como electrodo negativo se utilizan las paredes del depósito que son de cinc. El electrólito es una disolución de cloruro amónico ($Cl\ N\ H_4$).

La f.e.m. de esta pila está entorno a los 1,5 V. El principal inconveniente que presentan este tipo de pilas es que no pueden almacenarse durante mucho tiempo sin ser utilizadas, ya que el electrodo negativo de cinc tiende a disolverse lentamente; efecto conocido como descarga espontánea.

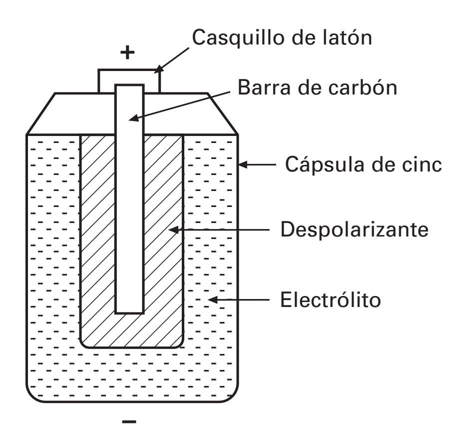


Figura 13.4

Pilas secas

Las pilas secas poseen una constitución similar a la pila Leclanché. Para evitar el escape del electrólito éste queda contenido en un material esponjoso y absorbente; además se encierra la pila con un recubrimiento impermeable y otro de acero. De esta manera se consigue que el líquido no se fuge hacia el exterior, por lo que se pueden transportar con facilidad. Este tipo de pila ha evolucionado mucho con el tiempo, añadiendo elementos que evitan la descarga espontánea y reducen al máximo la polarización, siendo por ahora la más utilizada para alimentación de aparatos portátiles, como linternas, aparatos de radio, etc.

Pilas de óxido de mercurio

En estas pilas se utiliza como electrodo negativo óxido de mercurio (Hg O), que además actúa como despolarizante (Figura 13.5). El electrodo positivo es de polvo de cinc prensado. El electrólito consiste en hidróxido potásico saturado de óxido de cinc, con el que se empapa un material absorbente. Con estas pilas se consigue una f.e.m. de

1,3 V aproximadamente, siendo su principal característica su gran capacidad (el doble que una seca corriente), larga duración y gran estabilidad de funcionamiento.

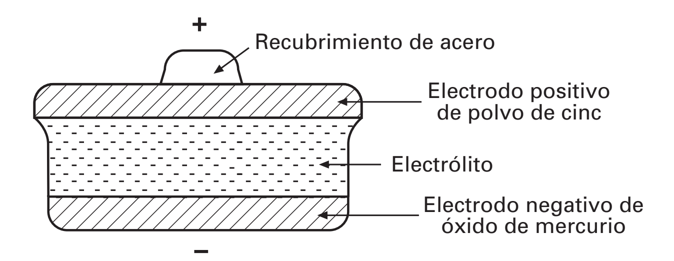


Figura 13.5

Pilas alcalinas

En estas pilas se utiliza fundamentalemte como electrólito hidróxido potásico. El electrodo positivo se puede utilizar pirolusita prensada y como negativo recortes de cinc. La principal característica de esta pila es su alta capacidad, que les hace ideales para alimentación de aparatos portátiles de consumo considerable, o cuando se desea una mayor vida de la pila.

Pilas de botón

Estas pilas se fabrican en formas muy aplanadas (forma de botón) (Figura 13.6). Como electrodo negativo se suele utilizar el indio y como positivo el bismuto. La principal característica de estas pilas que es pueden construir con tamaños muy pequeños (1 cm de diámetro), consiguiendo capacidades suficientes para impulsar el funcionamiento de relojes de pulsera, cámaras de fotos y vídeo, audífonos, etc.



Figura 13.6

Pilas de combustible

En una pila de tipo convencional se llega a su agotamiento cuando el electrodo negativo (por lo general de cinc) se disuelve y consume en el electrólito. Si fuésemos

capaces de aportar constantemente materia a los electrodos en disolución podríamos alargar la vida de la pila de una forma ilimitada. Este es el principio de funcionamiento de la pilas de combustible.

Un ejemplo de pila de combustible es en la que se utilizaran como electrodos elementos gaseosos como el oxígeno y el hidrógeno (Figura 13.7). En este caso el hidrógeno hace de electrodo negativo y es inyectado desde el exterior a un electrólito de hidróxido potásico concentrado. En el electrodo positivo introducimos oxígeno. Estos dos compuestos reaccionan con el electrólito produciendo agua y una diferencia de potencial entre ambos electrodos. La principal ventaja que tiene esta pila es que introducimos la cantidad de gas por los electrodos en función de la cantidad de electricidad a producir, pudiendo generar grandes cantidades de electricidad con un pequeño volumen de batería.

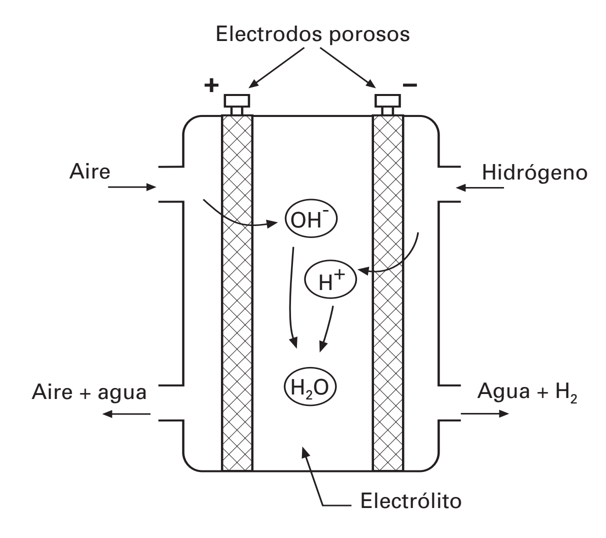


Figura 13.7

Resúmen de Conceptos

Para construir un elemento básico de una pila, basta con introducir dos electrodos de diferente material en un electrólito.

El electrodo que más rápido se disuelve adquiere carga negativa respecto al que lo hace más lentamente.

La tensión de una pila básica depende sobre todo de los materiales empleados como electrodos.

La polarización de una pila consiste en la acumulación de hidrógeno gaseoso entorno al electrodo positivo que impide el paso de la corriente eléctrica.

Las sustancias despolarizantes absorben el hidrógeno por oxidación y permiten un suministro de corriente más constante por parte de la pila.

En una pila Leclanché se utiliza como electrólito una disolución de cloruro amónico, el ánodo es de carbón, el cátodo de cinc y el despolarizante de pirolusita.

En las pilas secas el electrólito queda impregnado en un material absorbente.

Las pilas alcalinas y de óxido de mercurio poseen gran capacidad.

En las pilas de combustible su capacidad depende del material aportado como combustible a los electrodos.

Actividades

13.1 ¿Qué elementos fundamentales se necesitan para construir una pila eléctrica?

- **a.** ❑ Dos electrodos de diferente naturaleza y un electrólito.
- **b.** ❑ Dos electrodos de la misma naturaleza y un electrólito.

13.2 ¿De qué depende la f.e.m. que proporciona una pila?

- **a.** ❑ Exclusivamente del tipo de electrólito.
- **b.** ❑ De la naturaleza de los electrodos, tipo de electrólito y de su concentración y temperatura.
- **c.** ❑ Exclusivamente de la naturaleza de los electrodos.

13.3 ¿Por qué tiende a disminuir la f.e.m. de una pila al exigirle una corriente muy fuerte?

- **a.** ❑ Al sobrepasar la corriente de régimen nominal, el efecto de la polarización aumenta y causa una caída de la f.e.m.
- **b.** ❑ Una corriente fuerte calienta el electrólito y provoca una reducción drástica de la f.e.m.
- **c.** ❑ Disminuye por caída de tensión en la resistencia interna.

13.4 ¿Cómo se mide la f.e.m. de una pila?

- **a.** ❑ Mediante un voltímetro de alta resistencia, haciendo la medida a la intensidad de régimen nominal.
- **b.** ❑ Mediante un voltímetro de baja resistencia.
- **c.** ❑ Mediante un voltímetro de alta resistencia interna conectado entre los electrodos de la pila y sin conectar carga alguna (régimen de funcionamiento en vacío).

13.5 ¿Cuál es la principal cualidad de una pila seca?

- **a.** ❑ Que su electrólito es totalmente seco.
- **b.** ❑ Permite su transporte sin que se derrame el electrólito.
- **c.** ❑ Tienen menos capacidad que una líquida.

13.6 ¿Cómo son los electrodos en una pila de combustible?

- **a.** ❑ Los electrodos entran en combustión y arden.
- **b.** ❑ La materia de que consta los electrodos es suministrada según se consume.



Acumuladores

El principio de funcionamiento de los acumuladores es similar al de las pilas eléctricas (dos electrodos de diferente constitución sumergidos en un electrólito). La diferencia entre pilas y acumuladores está en que estos últimos se pueden recargar aplicando entre sus electrodos una diferencia de potencial perteneciente a una fuente de alimentación o cargador de baterías. De esta manera al hacer pasar corriente eléctrica por un acumulador descargado se consigue reponer la condiciones químicas iniciales.



Figura 14.1

Dependiendo del electrólito utilizado y de la constitución de los electrodos se pueden construir diferentes tipos de acumuladores. Según el tipo de electrólito utilizado los acumuladores pueden ser **ácidos** o **alcalinos**. En los ácidos se utiliza como electrólito una disolución de ácido sulfúrico (H_2SO_4), como es el caso de los acumuladores de plomo. En los alcalinos el electrólito suele ser hidróxido potásico (KOH), como es el caso de los acumuladores de níquel-cadmio y de níquel-hierro.

Principios generales de funcionamiento de los acumuladores

Experiencia 14.1

Consigue dos planchas de plomo y sumérgelas en un recipiente en la que se ha vertido una disolución de agua más ácido sulfúrico. Si ahora conectamos una lámpara de 2 V entre los electrodos podremos comprobar que no se enciende, ya que no se genera f.e.m. con dos electrodos iguales.

Una vez hecho esto, conecta a los electrodos una fuente de alimentación y suminstra una C.C. de unos 3 o 4 voltios. Al cabo de un tiempo podrás comprobar que, la corriente que circula desde los electrodos al electrólito produce reacciones químicas que transforma ambos elementos. Así, por ejemplo, se puede observar que uno de los electrodos toma un aspecto de color marrón oscuro.

Si ahora retiramos la fuente de alimentación y volvemos a conectar la lámpara, se podrá comprobar como la lámpara se enciende.

En la experiencia 14.1 la corriente de carga ha conseguido transformar la composición inicial de los electrodos. Al tener dos electrodos distintos sumergidos en el electrólito, aparece una f.e.m. que consigue encender la lámpara.

Una vez cargado un acumulador se comporta muy parecido a una pila, al conectar un receptor entre los electrodos la reacción química suministra corriente eléctrica al circuito exterior hasta que se agoten las materias activas de los mismos. Al aplicar tensión al acumulador descargado, la corriente eléctrica restituye las condiciones iniciales en la que se encontraban los electrodos y el electrólito.

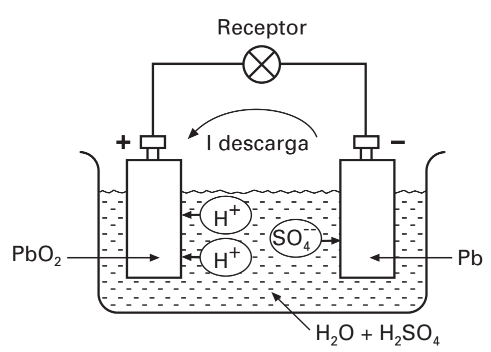
Acumuladores de plomo

Estos acumuladores constan de dos placas de plomo sumergidas en un electrólito formado por una disolución de agua destilada más ácido sulfúrico ($H_2SO_4 + H_2O$).

Cuando el acumulador está cargado, el electrodo negativo está constituido por una placa de gran superficie que aloja plomo puro (Pb) en estado esponjoso; y en el electrodo positivo la placa contiene dióxido de plomo (PbO_2) del color marrón oscuro. A su vez, la densidad del ácido sulfúrico es elevada, del orden de 1,2 a 1,28 g / cm^3.

Estado de los componentes de un acumulador **cargado**		
Placa positiva	*Electrólito*	*Placa negativa*
PbO_2	H_2SO_4	Pb

Si en estas condiciones conectamos un receptor entre ambas placas aparecerá una corriente eléctrica gracias a la f.e.m. generada por el mismo principio de funcionamiento de las pilas (Figura 14.2) (dos electrodos de diferente constitución sumergidos en un electrólito).



Acumulador de plomo cargado en estado de descarga.

Figura 14.2

En el proceso de descarga el ácido sulfúrico ataca químicamente ambas placas. Por un lado se disocia en 2 H y SO_4, que al recombinarse con las placas produce las siguientes reacciones químicas:

Placa positiva: $PbO_2 + 2\,H + H_2SO_4 \Rightarrow PbSO_4 + 2\,H_2O$

El dióxido de plomo de la placa positiva al combinarse con el ácido sulfúrico se transforman en sulfato de plomo más agua.

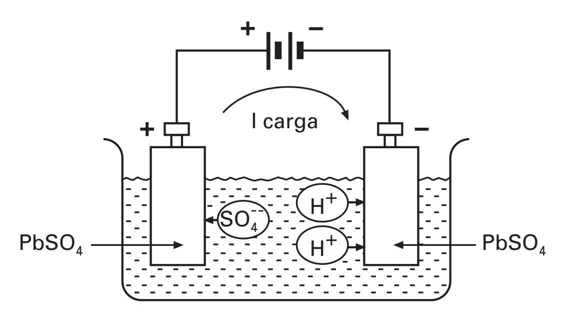
Placa negativa: $Pb + SO_4 \Rightarrow PbSO_4$

El plomo de la placa negativa junto con el azufre y el oxígeno se transforman también en sulfato de plomo.

De aquí se deduce que, durante la descarga, las placas se van transformando en sulfato de plomo, mientras que el electrólito cada vez hay menos ácido sulfúrico y más agua. Según van siendo las placas más iguales se produce menos f.e.m., llegando a la descarga total cuando ambas placas son totalmente de sulfato de plomo.

Estado de los componentes de un acumulador **descargado**		
Placa positiva	*Electrólito*	*Placa negativa*
SO_4Pb	$H_2SO_4+H_2O$	SO_4Pb

- ***Proceso de carga:*** Al aplicar una fuente de alimentación al acumulador descargado, tal como se muestra en la Figura 14.3, la corriente eléctrica fluye por el acumulador en sentido contrario al de descarga y se producen reacciones inversas en las placas y en el electrólito, recuperándose el estado inicial:



Acumulador de plomo descargado en estado de carga.

Figura 14.3

Placa positiva: $PbSO_4 + SO_4 + 2\ H_2O \Rightarrow PbO_2 + 2\ H_2SO_4$

Placa negativa: $PbSO_4 + 2\ H \Rightarrow Pb + H_2SO_4$

En el proceso de carga la placa positiva se vuelve a transformar en dióxido de plomo y en la negativa en plomo puro. En el electrólito aumenta la concentración del ácido sulfúrico.

Constitución de un acumulador

Un acumulador se puede constituir con una única célula. Dado que la tensión de una sola célula es baja (2 V en un acumulador de plomo), en la mayor parte de las aplicaciones prácticas se conectan varias células en serie y se introducen dentro de un mismo recipiente.

Los componentes básicos de que consta un acumulador son (véase Figura 14.4):

- Recipiente y tapas
- Rejillas y placas
- Tapones
- Separadores
- Electrólito
- Conexiones entre celdas

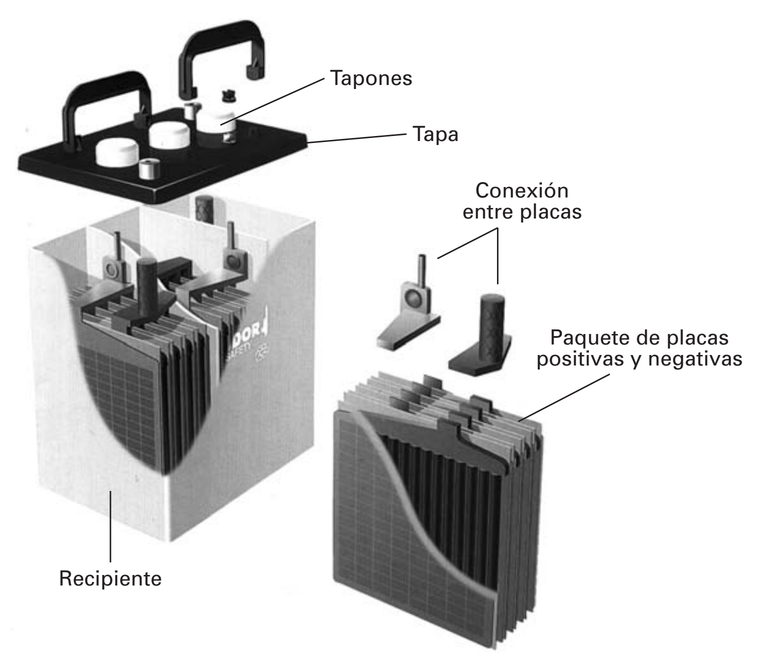


Figura 14.4

- ***Recipientes y tapas:*** El recipiente posee la función de albergar dentro de él los componentes de la batería de acumuladores. Como principales características que deben poseer estos elementos, caben destacar: buena resistencia a la corrosión, buena capacidad aislante y buena resistencia mecánica ante los golpes.

  La tapa, que sirve para cerrar el recipiente, debe de asegurar la estanqueidad del mismo.

  En ciertas aplicaciones es interesante que los recipientes sean transparentes, para así poder observar rápidamente el nivel del electrólito.

  Los materiales más empleados como recipientes son de plástico como por ejemplo el copolímero de polipropileno.

- ***Tapones:*** La función de los tapones es permitir la recarga del electrólito. Además deben hacer posible la evacuación de los gases que se desarrollan durante las fuertes corrientes. Los tapones deben impedir que los gases arrastren pequeñas gotas de electrólito, por lo que se fabrican con conductos en forma de laberinto que impiden la salida de líquidos al exterior.

  En la actualidad existen tapones que consiguen recombinar los gases (convierten el hidrógeno y el oxígeno liberado en agua) mediante un catalizador como el paladio. De esta manera se consiguen las baterías de acumuladores sin mantenimiento del electrólito.

- ***Rejillas y placas:*** Las placas son los electrodos del acumulador. Éstas deben ser buenas conductoras de la electricidad, así como retener muy bien los materiales activos. También deben ser resistentes a la corrosión.

  Las placas se suelen construir en forma de rejilla, de tal forma que los materiales activos no se desprendan con las vibraciones. Cuando nos referimos a los materiales activos estamos hablando de las sustancias empleadas como electrodos.

- ***Electrólito:*** Un aspecto importante del electrólito es su resistencia eléctrica, que conviene que sea baja, dependiendo este factor fundamentalmente de la densidad del mismo. Esta densidad suele estar entorno a 1,28 g/cm^3 para acumuladores de plomo.

  La densidad del electrólito varía con la carga. Así, por ejemplo, en un acumulador de plomo, la densidad en plena carga puede llegar a 1,3 g/cm^3, disminuyendo su hasta 1,1 g/cm^3 para el acumulador descargado.

- ***Separadores:*** En un acumulador moderno se tiende a reducir su tamaño, por lo que se colocan las placas de diferente polaridad muy próximas, pudiendo producirse contactos indeseables y cortocircuitos entre las mismas. Para evitar esto se intercalan entre las placas unos separadores de tipo plástico. Éstos deben ser muy porosos para facilitar el movimiento iónico entre las placas.

- ***Conexión entre celdas:*** Cuando disponemos de varias celdas en un solo recipiente, con la idea de aumentar la tensión de una batería, se hace necesario realizar la conexión entre placas positivas y negativas de celdas contiguas.

Capacidad de un acumulador

La capacidad de un acumulador nos indica la cantidad de electricidad que almacena el mismo. Ésta se mide en Amperios · hora (Ah) y se calcula mediante la expresión:

$$Q = I \cdot t$$

Ejemplos

14.1 Una batería de acumuladores de plomo con una capacidad de 92 Ah se descarga en 10 horas. Determinar la corriente media de descarga.

Solución: $Q = I \cdot t$ despejando $I = \frac{Q}{t} = \frac{92}{10} = 9{,}2\ \text{A}$

La capacidad de un acumulador depende fundamentalmente de su tamaño, así como del número de células o elementos acoplados. Además de éstos, también influyen otros factores:

- Las bajas temperaturas disminuyen la capacidad.
- Cuando exigimos que el acumulador ceda grandes cantidades de corriente, las reacciones químicas en las placas son más superficiales, por lo que el acumulador se descarga más rápido y disminuye su capacidad.

De aquí se deduce que la capacidad de un acumulador es mayor cuanto menor sea la intensidad de descarga. Los fabricantes nos proporcionan información sobre las capacidades de los diferentes tipos de acumuladores en función de la corriente de descarga y el tiempo de descarga. En la Tabla 14.1 se muestra un ejemplo de cómo se comportan varios acumuladores comerciales de FEMSA para diferentes intensidades y tiempos de descarga.

Referencia	**Capacidad-Ah en un tiempo de descarga de:**			**Intensidad máxima de carga en A**
	100 h	**10 h**	**5 h**	
2AEF-100-1	160	100	130	17
3AEF-150-1	240	150	130	26
4AEF-200-1	320	200	170	34
5AEF-250-1	400	250	215	43

Tabla 14.1

Tensión y corriente de carga de un acumulador

Para cargar una batería de acumuladores hay que conectar una fuente de alimentación de C.C. que proporcione una tensión superior a la nominal de la batería, situando el polo positivo de la fuente de alimentación con el positivo de la batería y el negativo de la fuente con el negativo de la batería.

En este proceso es importante vigilar que la corriente no supere los valores máximos recomendados por el fabricante. Este valor suele estar entorno al 10% del valor de la capacidad del acumulador. Así, por ejemplo, para un acumulador con 80 Ah sería aconsejable no superar los 8 amperios de corriente de carga.

Por lo general, utilizaremos como fuente de alimentación, un cargador de baterías. Con él se fija la corriente máxima de carga, realizando un proceso automático de la regulación de carga y desconectándose una vez alcanzada la carga completa.

Ejemplos

14.2 En el circuito que se muestra en la Figura 14.5 aparece el sistema de carga de una batería de acumuladores de un automóvil. Averiguar la tensión que debe proporcionar la fuente de alimentación (F.A.) para conseguir que la intensidad de carga de la batería sea de 15 A, teniendo en cuenta para ello que la resistencia interna de la misma es 0,2 Ω y que la fuerza electromotriz en el actual estado de carga es de 10 V.

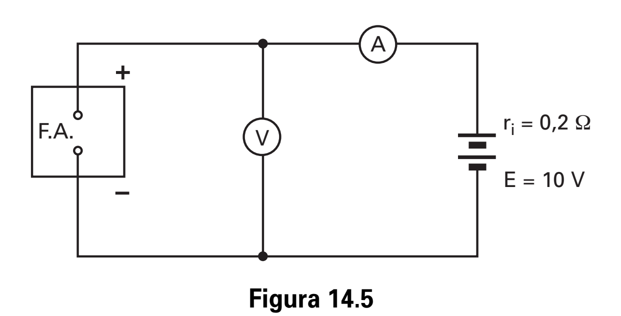


Figura 14.5

Solución: Si aplicamos la segunda ley de Kirchhoff al circuito cerrado formado, tendremos que la tensión (V) que tiene que proporcionar la fuente de alimentación será la suma de la f.e.m. (E) de la batería más la caída de tensión ($r \cdot I$) que se produce en la resistencia interna.

$$V = E + r \cdot I = 10 + 0,2 \cdot 15 = 13 \text{ V}$$

Tensión y corriente de descarga

Cuando se conecta un acumulador de plomo a un receptor, su tensión en bornes tiende a disminuir debido a la caída de tensión en su resistencia interna. Según se va descargando el acumulador, la tensión en bornes va disminuyendo, pudiendo llegar a desaparecer por completo. Por supuesto, es importante no llegar nunca a este extremo. De hecho, se recomienda no descender nunca de la **tensión límite de descarga**, que el caso de un acumulador de plomo está en aproximadamente 1,8 voltios. Por debajo de esta tensión, el proceso de descarga tiende a formar cristales muy grandes de sulfato de plomo (SO_4Pb) en las placas (sulfatación de las placas), que hacen difícil su reconstitución en el proceso de carga.

Para evitar que una batería de acumuladores se descargue por debajo de la tensión límite de descarga se utilizan reguladores automáticos que vigilan constantemente la

tensión y corriente en bornes de la batería, produciendo la desconexión de la misma en caso de alcanzar valores no recomendables.

Resistencia interna

La resistencia interna de un acumulador de plomo es muy pequeña. Esto aporta ciertas ventajas e inconvenientes.

Al ser baja la resistencia interna, la caída de tensión que en ella se origina también lo es, por lo que la tensión en bornes es más estable con los cambios de corriente. Además las pérdidas de potencia son bajas.

Por otro lado, en caso de producirse un cortocircuito, esta pequeña resistencia interna provoca que la corriente sea muy elevada, pudiendo llegar a deformar las placas. En conclusión, se deben evitar los cortocircuitos con unas protecciones adecuadas.

Vida de un acumulador

La duración de un acumulador no es ilimitada. Los largos períodos de almacenamiento sin recarga y la simple utilización del mismo, producen transformaciones en los electrodos, como la corrosión, sulfatación de placas, etc. que hacen que la capacidad del acumulador disminuya hasta valores no aceptables para su correcto funcionamiento. Además, los ciclos constantes de carga y descarga producen desprendimientos de materia activa de los electrodos, que acaban sedimentándose en el fondo del recipiente del electrólito, pudiendo llegar a provocar cortocircuitos entre ambas placas. El resultado es la inutilización definitiva del acumulador.

Autodescarga de un acumulador

Cuando se tiene un acumulador sin ser usado durante un largo período de tiempo se produce una disminución de su capacidad. A este hecho se le conoce como autodescarga.

La descarga espontánea de los acumuladores es mucho mayor que en las pilas. Para evitar que los efectos de la autodescarga puedan dañar a un acumulador almacenado durante largo tiempo conviene llevar a cabo recargas periódicas que compensen las pérdidas provocadas por la autodescarga. Así, por ejemplo, en un acumulador de plomo se produce una pérdida entorno al 100% de su capacidad en un año debido a la

autodescarga. En los acumuladores alcalinos estos valores son inferiores y rondan el 30% por año.

El factor que más influye en la autodescarga es la temperatura, de tal forma que si se desea almacenar una batería de acumuladores durante un largo tiempo es conveniente hacerlo a bajas temperaturas.

Aplicaciones de los acumuladores de plomo

La batería de acumuladores de mayor uso es la de plomo-ácido, seguidas por las de tipo alcalino níquel-cadmio.

Uno de los principales inconvenientes que presentan los acumuladores de plomo es que poseen una vida relativamente corta. Los fenómenos de sulfatación son los responsables de esta situación. Desde este punto de vista los acumuladores alcalinos son más ventajosos por su larga duración.

Por otro lado, los acumuladores de plomo resultan menos costosos que los alcalinos en su fabricación. Además, su f.e.m. es superior a la conseguida por los alcalinos, lo que reduce el número de celdas a conectar en serie. También podemos encontrar como ventajas de los acumuladores de plomo frente a los alcalinos su baja caída de tensión y su alto rendimiento.

De esto se deduce que las baterías alcalinas se emplearán más en aquellas aplicaciones donde la duración de las baterías sea importante, como ejemplo las estaciones de baterías estacionarias. La baterías estacionarias se caracterizan porque suelen estar casi siempre cargadas en espera de una demanda ocasional, como por ejemplo en instalaciones fotovoltaicas solares, suministro de emergencia de energía eléctrica para hospitales, telefonía, ordenadores, balizas señalizadoras, etc.

Los acumuladores de plomo se utilizarán más en aquellas aplicaciones donde se exija a la batería fuertes demandas de corrientes en ciclos constantes de carga y descarga, como ejemplo: baterías de arranque empleadas en vehículos con motor de combustión, baterías de tracción como las que se utilizan en vehículos eléctricos, carretillas elevadoras, etc.

Acumuladores alcalinos

En los acumuladores alcalinos el electrólito que se utiliza consiste en una solución de hidróxido potásico (KOH). Según el material que se empleé en las placas se pueden construir diferentes tipos de acumuladores, con la idea de encontrar las características

idóneas para cada una de las aplicaciones posibles. En la Tabla 14.2 se da una relación de los diferentes tipos de acumuladores alcalinos.

Acumuladores alcalinos		
Electrodo positivo de óxido de níquel	*Electrodo positivo de óxido de plata*	*Electrodo negativo de hidrógeno*
Níquel-cadmio Níquel-hierro Níquel-cinc	Plata-cinc Plata-cadmio Plata-hierro	Níquel-hidrógeno Plata-hidrógeno

Tabla 14.2

Dentro de estos acumuladores los más utilizados hasta ahora son los de níquel-cadmio y el de níquel-hierro. Los acumuladores con electrodos de plata resultan muy caros, aunque sus buenas características les hace ideales para aplicaciones de interés estratégico (satélites, equipos militares, etc). A continuación estudiaremos las características más significativas de algunos de ellos.

Acumuladores de níquel-cadmio (Ni-Cd)

En estos acumuladores el electrodo positivo es de hidróxido de níquel y el negativo de hidróxido de cadmio. El electrólito es como siempre hidróxido potásico (potasa cáustica). En estos acumuladores la concentración del electrólito no cambia con el estado de carga del acumulador y se mantiene aproxidamente en 1,2 g/cm^3.

Una de las principales ventajas de estos acumuladores es que necesitan de poco mantenimiento. Además poseen una alta resistencia mecánica y pueden permanecer largos períodos de tiempo descargados sin sufrir desperfectos.

El acumulador de Ni-Cd es el que más se está utilizando después del de plomo, aunque la alta toxicidad del cadmio está limitando cada vez más su empleo. Además, son mucho más caros. A pesar de todo, su larga vida, buen comportamiento a bajas temperaturas, buena resistencia mecánica a las vibraciones y baja autodescarga, les hace ideales para multitud de aplicaciones.

La fuerza electromotriz de una celda es baja, del orden de 1,29 V, lo que obliga a conectar más celdas en serie en una batería si deseamos obtener tensiones considerables.

Acumuladores de níquel-hierro (Ni-Fe)

En estos acumuladores el electrodo negativo es básicamente de hierro, lo que presenta algunos inconvenientes, como: baja solubilidad de los óxidos que provocan una pérdida de eficacia en la descarga, sobre todo a bajas temperaturas. Además, la autodescarga es considerable y existe un alto desprendimiento de gases.

A pesar de todo los acumuladores de Ni-Fe presentan algunas ventajas que les hace ideales para algunas aplicaciones. Estas ventajas son: larga vida en ciclos de carga-descarga, buena resistencia mecánica, largos tiempos de almacenamiento en estado de descarga, nula toxicidad y resultan más económicos que los de NI-Cd.

La f.e.m. de estos acumuladores es también baja, del orden de 1,4 V.

Operaciones básicas de mantenimiento de acumuladores

La vida útil y el rendimiento de un acumulador depende fundamentalmente de su cuidado y mantenimiento. Las tareas de mantenimiento consisten en revisiones periódicas y actuaciones como son:

- Vigilancia del estado del electrólito.
- Limpieza.

Un de los aspectos más importante en el mantenimiento de una batería de acumuladores es la vigilancia del nivel y concentración del electrólito. En el caso de que éste no llegase a cubrir las placas, se debe rellenar el recipiente con el electrólito adecuado hasta reponerlo al nivel adecuado. Para realizar esta tarea habrá que vigilar el estado de carga de la batería, ya que la densidad del electrólito depende de esta variable. Para hacer esta tarea se suele tomar una muestra del electrólito, se comprueba su densidad con un *densímetro* (véase Figura 14.6), se prepara una disolución de la misma densidad y se añade al recipiente.

También es conveniente sustituir totalmente el electrólito con una cierta periocidad, ya que después de numerosos ciclos de carga y descarga, el electrólito se contamina con partículas sólidas en suspensión que pueden llegar a provocar cortorcircuitos entre placas. Los fabricantes indican cada cuánto tiempo hay que realizar estas tareas.

En las baterías de acumuladores con mantenimiento (no disponen de tapones especiales que recombinan los gases generados y los reconvierten en líquido que son retornados al electrólito) existen fugas constantes de agua por los tapones. De esta manera, cuando se observa una disminución del nivel de electrólito hay que

compensarla vertiendo agua destilada, teniendo en cuenta que la densidad del mismo se mantenga en los valores prefijados.

Otra tarea fundamental de mantenimiento consiste en la limpieza. Cada cierto tiempo conviene realizar una limpieza exterior que eviten las sulfataciones y oxidaciones de los bornes de conexión

Por último, es importante hacer cumplir ciertas normas de seguridad que eviten los peligros en el manejo de los acumuladores, como son:

- Evitar derrames o salpicaduras del electrólito, ya que son perjudiales para la piel.
- El hidrógeno que se desprende en los acumuladores puede formar atmósferas explosivas si se llega a concentrar, por lo que es conveniente instalar las baterías en lugares bien ventilados. Además, las salas de baterías deben de disponer de instalaciones que no provoquen chispas.
- Cubrir las conexiones de las baterías con buenos materiales aislantes, de esta forma evitaremos cortorcircuitos producidos por caída de materiales metálicos.

Medida de la carga de una batería de acumuladores

Dentro de los trabajos de mantenimiento periódico, la medida del estado de carga de una batería es importante, ya que una batería descargada durante largos períodos de tiempo puede provocar daños irreparables en las mismas.

La medida del estado de carga se puede realizar de varias maneras:

- Midiendo la densidad del electrólito.
- Midiendo la tensión de las celdas.

El primer procedimiento sólo es válido para acumuladores de plomo. En los acumuladores alcalinos la densidad del electrólito se mantiene prácticamente constante en los ciclos de carga y descarga.

En un acumulador de plomo la densidad del electrólito depende del estado de carga, de tal forma que según aumenta el estado de carga aumenta su densidad. Los fabricantes de baterías nos proporcionan información sobre la densidad de los electrólitos en función del estado de carga y la temperatura del electrólito. Seguidamente, se exponen a modo de ejemplo los valores de densidad de un electrólito de un acumulador de plomo:

- Totalmente cargado........................1,275 g/cm^3
- Media carga..1,23 g/cm^3
- Descargado...1,1 g/cm^3

Para la medir la densidad del electrólito utilizamos el densímetro (véase Figura 14.6).

Para medir la tensión de un acumulador es necesario emplear un voltímetro especial, al que se le ha incorporado una resistencia en paralelo, tal como se muestra en la Figura 14.7. De esta forma, al medir la tensión del elemento se le somete a una descarga fuerte durante unos pocos segundos. Los fabricantes de acumuladores nos proporcionan información del estado de carga en función de la tensión medida con estos aparatos, manteniéndose la tensión en valores más altos para acumuladores totalmente cargados.

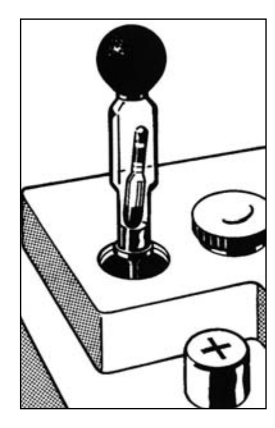


Figura 14.6

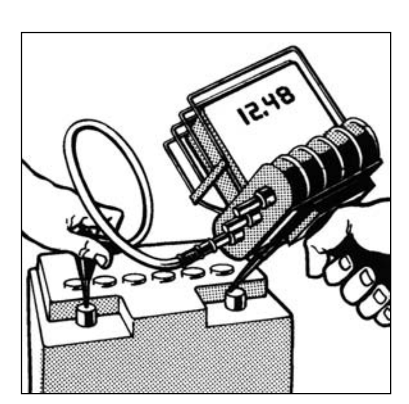


Figura 14.7

Resúmen de Conceptos

Según el tipo de electrólito utilizado los acumuladores pueden ser **ácidos** o **alcalinos**.

Cuando un acumulador de plomo está cargado, el electrodo negativo es de plomo puro (Pb) en estado esponjoso; y en el electrodo positivo la placa contiene dióxido de plomo (PbO_2). A su vez, la densidad del ácido sulfúrico es elevada, del orden de 1,2 a 1,28 g/cm^3.

En un acumulador de plomo descargado, ambos electrodos son de sulfato de plomo (SO_4Pb) y la densidad del electrólito es del orden de 1,1 g/cm^3.

Las f.e.m. de los acumuladores depende de su constitución: acumulador de plomo (2 V), acumulador de Ni-Cd (1,29 V), acumulador de Ni-Fe (1,4 V).

La capacidad de un acumulador se mide en amperios hora ($Q = I \cdot t$).

En el proceso de carga es importante vigilar que la corriente no supere los valores máximos recomendados por el fabricante.

En el proceso de descarga no se debe descender por debajo de la tensión límite de descarga, así evitamos fenómenos de sulfatación.

El fenómeno de la autodescarga es mucho más acusado y más perjudicial en un acumulador de plomo que en un alcalino.

La característica común de los acumuladores alcalinos es que utilizan un electrólito de hidróxido potásico (KOH).

La principal ventaja de los acumuladores alcalinos es que presentan menos problemas de mantenimiento, son muy robustos y posen una vida muy larga.

La densidad del electrólito en un acumulador de plomo depende del estado de carga del mismo, mientras que en los alcalinos permanece prácticamente constante.

Actividades

14.1. ¿Qué diferencias fundamentales existen entre una pila y un acumulador?

- **a.** ❑ Los acumuladores duran más que las pilas.
- **b.** ❑ Las pilas son recargables y los acumuladores no.
- **c.** ❑ Los acumuladores son recargables y las pilas no.

14.2. ¿De qué depende fundamentalmente la autodescarga de un acumulador?

- **a.** ❑ Exclusivamente del tipo de acumulador.
- **b.** ❑ De la temperatura.
- **c.** ❑ De la densidad del electrólito.

14.3. Indica qué acumuladores emplean hidróxido potásico como electrólito.

- **a.** ❑ Acumulador de níquel-hierro.
- **b.** ❑ Acumulador de plomo.
- **c.** ❑ Acumulador de níquel-cadmio.

14.4. ¿De qué depende la capacidad de un acumulador?

a. ❏ Del tamaño, temperatura y régimen de descarga.

b. ❏ Depende exclusivamente del tipo de acumulador.

c. ❏ De la densidad del electrólito.

14.5. ¿Qué característica fundamental poseen las baterías sin mantenimiento?

a. ❏ Poseen una mayor duración.

b. ❏ Utilizan unos tapones de recombinación que evitan disminución del nivel del electrólito.

c. ❏ Cuando se estropean se tiran.

14.6. ¿Cómo se puede medir el estado de carga de un acumulador de plomo?

a. ❏ Midiendo la densidad del electrólito.

b. ❏ Midiendo la tensión de los elementos.

c. ❏ Observando el nivel del electrólito.

14.7. El fenómeno de sulfatación de las placas,

a. ❏ Se produce en los acumuladores alcalinos.

b. ❏ Se produce en los acumuladores de plomo por trabajar con bajos regímenes de carga.

c. ❏ Es beneficioso para las placas de los acumuladores.

14.8. Una batería de acumuladores de plomo con una capacidad de 110 Ah alimenta un tubo fluorescente de 20 W. Si la tensión media en el proceso de descarga es de 12 V, determinar el tiempo de descarga de la misma.

Resultado: 66 horas.

15 Magnetismo y electromagnetismo

El magnetismo tiene que ver con fenómenos de atracción y repulsión que se dan con los imanes y con los materiales ferromagnéticos, y el electromagnetismo con fenómenos magnéticos que aparecen cuando los conductores y bobinas son recorridos por una corriente eléctrica. El estudio de estas dos ciencias es importante, ya que aprovechando estos fenómenos se pueden construir electroimanes, transformadores, motores, generadores de electricidad como las dinamos y alternadores, altavoces, relés y contactores, cerraduras electromagnéticas, cocinas de inducción, detectores de metales, electroválvulas y un sinfín más de aplicaciones.

Imanes

Si tomamos un imán e intentamos acercar diferentes objetos metálicos, podremos observar que éste atrae con fuerza sólo aquellos objetos que sean de hierro o de acero. Este fenómeno también se da con el níquel y el cobalto. A estos materiales que son susceptibles de ser atraídos por un imán se les conoce por el nombre de **materiales ferromagnéticos**.

Las aplicaciones de los imanes son muy variadas, ya que con ellos se pueden producir fuerzas mecánicas considerables. Así, por ejemplo se pueden utilizar como separadores magnéticos que separan materiales magnéticos de no magnéticos. Otras aplicaciones de los imanes son: pequeñas dinamos, micrófonos, altavoces, aparatos de medida analógicos y pequeños motores eléctricos de C.C.

Polos de un imán

Si depositamos una cantidad de limaduras de hierro sobre un imán recto como el de la Figura 15.1, podremos observar que aparece una mayor concentración de éstas en los extremos del imán. A su vez también se puede comprobar como esta concentración disminuye hacia el centro, hasta desaparecer prácticamente en el centro.

A las zonas donde se produce la mayor atracción se las denomina polos magnéticos. A la zona donde no hay atracción se la denomina línea neutra.

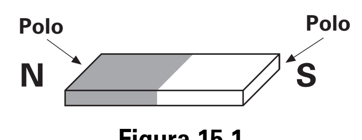


Figura 15.1

Brújula

Una brújula es una aguja imantada que puede girar libremente en su eje central (Figura 15.2). Si nosotros dejamos girar libremente a la aguja imantada de una brújula, ésta se orientará siempre con un extremo hacia el polo norte terrestre y el otro hacia el sur. De aquí proviene el nombre de los polos de un imán. Al extremo de la aguja que se orienta hacia el norte geográfico terrestre se le denomina **polo norte**, y al otro **polo sur**.

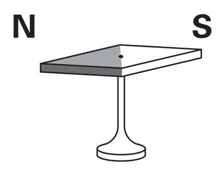


Figura 15.2

Dado que en los imanes, los polos del mismo nombre desarrollan fuerzas de repulsión y los de diferente nombre de atracción, mediante una brújula será fácil determinar los nombres de los polos. Para ello bastará con acercar la brújula a unos de los polos del imán y comprobar si existe atracción o repulsión del polo norte de la misma.

Clases de imanes

En la naturaleza se pueden encontrar **imanes naturales**, como la magnetita, que poseen ciertas propiedades magnéticas. Ahora bien, si lo que deseamos es potenciar

dichas propiedades se pueden fabricar **imanes artificiales** a partir de substancias ferromagnéticas.

A su vez los imanes artificiales, o substancias magnetizadas, dependiendo del tipo de substancia utilizada, una vez magnetizados pueden mantener durante largo tiempo sus propiedades magnéticas (imanes permanentes) o sólo cuando están sometidos a la acción de un campo magnético (imanes temporales).

Como ejemplo de imanes temporales tenemos al hierro puro y como imán permanente al acero. Mediante una sencilla experiencia se puede comprobar como al acercar un trozo de acero (por ejemplo un destornillador) a un imán, queda magnetizado, apreciándose sus propiedades de atracción aunque retiremos el imán de dicho trozo de acero. Sin embargo, si utilizamos un trozo de hierro para la experiencia (por ejemplo un clavo de hierro), éste manifiesta propiedades de atracción hacia otros materiales sólo cuando está bajo la acción del campo magnético del imán; una vez retirado el imán, dicho trozo de hierro pierde prácticamente todas las propiedades magnéticas adquiridas.

Para la construcción de imanes permanentes se utilizan aleaciones de: acero-tungsteno, acero-cobalto, acero al titanio, hierro-níquel-aluminio-cobalto y otras más.

Los imanes temporales son de gran utilidad para la construcción de núcleos para electroimanes, motores, generadores y transformadores. En estos casos se emplea la chapa de hierro aleada, por lo general, con silicio.

Teoría molecular de los imanes

Si rompemos un imán en dos, las dos partes resultantes son dos imanes completos con sus polos correspondientes. Si volviésemos a romper una de estas partes obtendríamos otros dos nuevos imanes. Este proceso se puede repetir multitud de veces hasta alcanzar lo que vendremos a llamar **molécula magnética**.

Según esta teoría, se puede suponer que: Un imán está compuesto de moléculas magnéticas perfectamente orientadas con los polos respectivos del imán (Figura 15.3). Un trozo de hierro sin imantar está compuesto de moléculas magnéticas totalmente desorientadas (Figura 15.4).

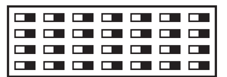


Figura 15.3

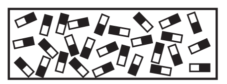


Figura 15.4

Esta teoría nos servirá de gran ayuda para comprender fenómenos complejos como la permeabilidad, la saturación magnética, histéresis, etc, que estudiaremos más adelante.

Gracias a esta teoría también podremos entender más fácilmente el comportamiento de los materiales magnéticos utilizados para la elaboración de imanes permanentes y artificiales. En el caso de los imanes permanentes, aparece una especie de rozamiento interno entre las moléculas magnéticas que dificulta el retorno a el estado inicial una vez orientadas y magnetizadas. Al contrario, en los imanes temporales las moléculas magnéticas se ordenan y desordenan con facilidad, en función de la influencia ejercida por la acción de un campo magnético externo al mismo.

Las propiedades magnéticas de los imanes se ven alteradas por la temperatura, así por ejemplo, el hierro puro pierde totalmente su magnetismo por encima de los 769 °C. Por otro lado, si golpeamos fuertemente una trozo de acero imantado se puede modificar su propiedades magnéticas. Esto es debido a que los golpes pueden cambiar el orden de las moléculas magnéticas.

Campo magnético de un imán

Se puede decir que el campo magnético es el espacio, próximo al imán, en el cual son apreciables los fenómenos magnéticos originados por dicho imán.

El campo magnético de un imán es más intenso en unas partes que otras. Así, por ejemplo, el campo magnético adquiere su máxima intensidad en los polos, disminuyendo paulatinamente según nos alejamos de ellos. Para poder hacernos una idea del aspecto que tiene el campo magnético, o sea, de su espectro magnético, realiza la siguiente experiencia:

Experiencia 15.1

Se toma un imán sobre el que se coloca un lámina de plástico transparente y se espolvorea con limaduras de hierro, procurando que queden uniformemente repartidas por toda la superficie de la lámina de plástico transparente. Las limaduras de hierro se orientan sobre la misma dibujando la forma del campo magnético (Figura 15.5).

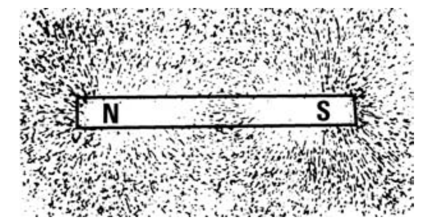


Figura 15.5

Observa cómo hay más limaduras concentradas en los extremos y que existen unas cadenas de limaduras formando unas líneas que van de un polo a otro. A estas cadenas se las conoce por el nombre de **líneas de fuerza del campo magnético**.

Las líneas de campo se pueden dibujar tal como se muestra en la Figura 15.6. Las líneas de fuerza únicamente representan la forma del campo magnético. Ahora bien, por motivos de convencionalismos teóricos, se les da un sentido de circulación, de tal forma que se dice que las líneas de campo salen por el polo norte del imán, recorren el espacio exterior y entran por el polo sur. El sentido de circulación de estas líneas por el interior del imán es del sur al norte.

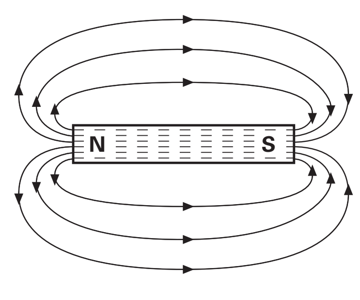


Figura 15.6

La visualización de las líneas de campo resulta muy interesante, ya que conociendo su dirección podemos determinar la polaridad de un determinado campo magnético. Además, la mayor o menor concentración de las mismas nos indica lo intenso que es el campo en una determinada zona.

En la Figura 15.7 se puede observar como cuando acercamos dos imanes por sus polos iguales, las líneas de campo se repelen. Sin embargo, si acercamos dos imanes por sus polos opuestos (Figura 15.8), las líneas de campo se establecen en la misma dirección y se suman.

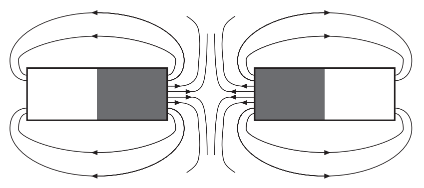


Figura 15.7

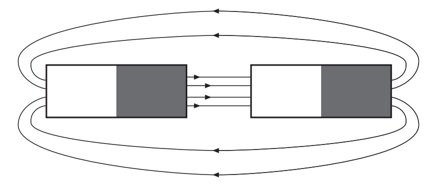


Figura 15.8

Electromagnetismo

Los imanes producen un campo magnético considerable, pero para ciertas aplicaciones éste resulta todavía muy débil. Para conseguir campos más intensos utilizaremos bobinas fabricadas con conductores eléctricos, que al ser recorridos por una corriente eléctrica desarrollan campos magnéticos cuya intensidad depende fundamentalmente de la intensidad de la corriente y del número de espiras de la bobina.

Campo magnético creado por un conductor cuando es atravesado por una corriente eléctrica

Si nosotros espolvoreamos limaduras de hierro sobre una hoja de papel que es atravesada por un conductor por donde circula una corriente eléctrica (Figura 15.9), observaremos que las limaduras se orientan y forman un espectro magnético de forma circular (Figura 15.10).

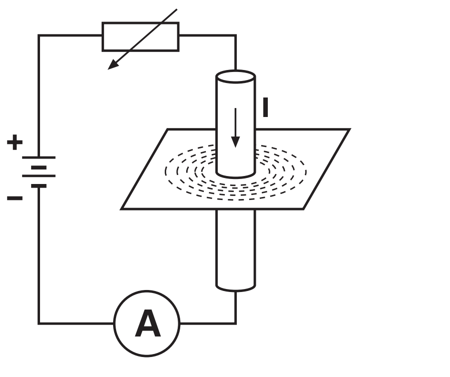



Figura 15.9


Figura 15.10

Esto nos demuestra que cuando un conductor es atravesado por una corriente eléctrica, a su alrededor aparece un campo magnético. Observando el espectro del campo magnético se puede apreciar que las líneas de fuerza toman la forma de círculos concéntricos que se cierran a lo largo de todo el conductor.

Si situamos varias agujas imantadas alrededor del conductor, podremos observar como su orientación depende del sentido de la corriente. Para determinar el sentido de las líneas de fuerza de una forma sencilla, se aplica la regla del sacacorchos o de Maxwell que dice así: *El sentido de las líneas de fuerza, concéntricas al conductor, es el que indicaría el giro de un sacacorchos que avanzase en el mismo sentido que la corriente* (Figura 15.11).

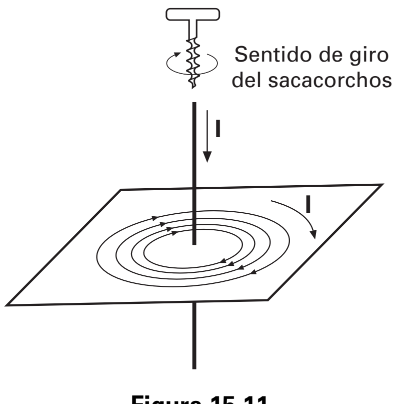


Figura 15.11

Nota: Para aplicar correctamente esta regla se emplea el sentido convencional de la corriente.

La intensidad del campo magnético desarrollado por el conductor depende fundamentalmente de la intensidad de la corriente que fluye por el conductor. A más intensidad de corriente más intensidad de campo.

Campo magnético en un conductor en forma de anillo

Un conductor recto produce un campo magnético muy disperso y, por tanto, muy débil. La forma de conseguir que el campo magnético sea más fuerte es disponiendo el conductor en forma de anillo.

El sentido de las líneas de fuerza de una parte del conductor se suma a la del otro, formando un campo magnético mucho más intenso en el centro de la espira (Figura 15.12). En la Figura 15.13 se puede apreciar el efecto de concentración de las líneas de campo en el centro del anillo al que, como en otras ocasiones, se le ha realizado el espectro magnético con limaduras de hierro.

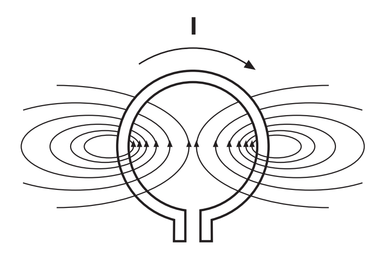


Figura 15.12

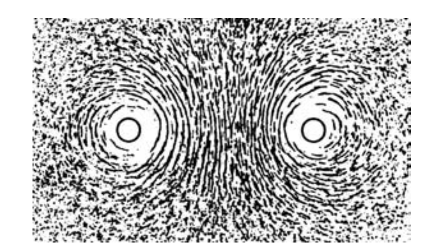


Figura 15.13

Campo magnético formado por una bobina

En una bobina, el campo magnético de cada espira se suma al de la siguiente, concentrándose éste en el centro de la misma. El campo resultante es uniforme en el centro de la espira y mucho más intenso que en el exterior. En los extremos de la bobina se forman los polos magnéticos (Figura 15.14).

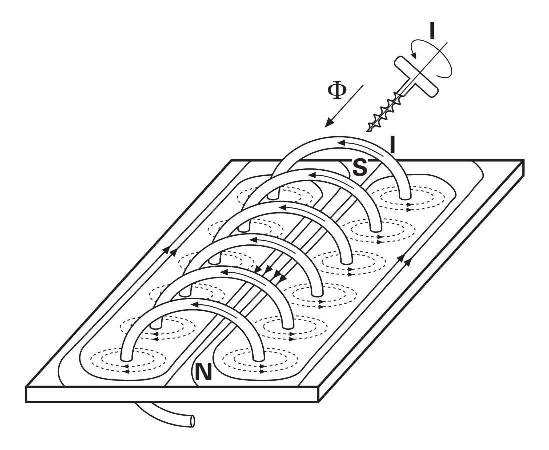


Figura 15.14

Para determinar el sentido de las líneas de fuerza se aplica la regla del sacacorchos, pero de otra forma. Basta con girar el sacacorchos, en el mismo sentido de giro que la corriente eléctrica por las espiras. El sentido de avance del sacacorchos nos indica el sentido de las líneas de fuerza. Una vez determinado este sentido, bien fácil es determinar los polos de la bobina (el polo norte estará situado en el extremo por donde salen las líneas de fuerza y el sur por donde entran).

Magnitudes magnéticas

Al igual que para definir el comportamiento de un circuito eléctrico utilizamos las magnitudes eléctricas, para definir los campos electromagnéticos utilizamos las magnitudes magnéticas.

- **Flujo magnético (Φ)**: El campo magnético se representa a través de las líneas de fuerza. A la cantidad de estas líneas se le denomina flujo magnético.

  Se representa por la letra griega Φ; sus unidades son:

  - **El weber (Wb)** en el sistema internacional.
  - **El maxvelio (Mx)** en el sistema c.g.s.

  La relación que existe entre ambas unidades es $1\ \text{Wb} = 10^8\ \text{Mx}$

- **Inducción magnética (B)**: La inducción magnética se define como la cantidad de líneas de fuerza que atraviesan perpendicularmente la unidad de superficie. En cierta forma, nos indica lo densas que son las líneas de fuerza, o lo concentradas que están, en una parte del campo magnético.

  Se representa por la letra griega B; sus unidades son:

  - **La tesla (T)** en el sistema internacional.
  - **El gaus (Gs)** en el sistema c.g.s.

  La relación que existe entre ambas unidades es 1 T = 10^4 Gs.

Se dice que existe una inducción de una tesla cuando el flujo de un weber atraviesa perpendicularmente una superficie de un metro cuadrado.

$$1 \text{ tesla} = \frac{1 \text{ weber}}{1 \text{ m}^2} \qquad\qquad B = \frac{\Phi}{S}$$

Ejemplos

15.1 ¿Cuál es la inducción magnética existente en la cara plana del polo de un imán recto de 30 cm² de superficie cuando es atravesado por un flujo magnético de 0,009 Wb? Expresar el resultado en teslas.

Solución: $$B = \frac{\Phi}{S} = \frac{0,009}{0,003} = 3 \text{ T}$$

$$30 \text{ cm}^2 = 30/10.000 = 0,003 \text{ m}^2$$

15.2 ¿Cuál será el flujo magnético que existe en el campo magnético producido por una bobina si ésta tiene un núcleo de 20 cm² de superficie y la inducción magnética en la misma es de 1,5 teslas?

Solución: Despejando de la fórmula general:

$$\Phi = B \cdot S = 1,5 \cdot 0,002 = 0,003 \text{ Wb} = 3 \text{ mWb (miliweber)}$$

- **Fuerza magnetomotriz ($\mathscr{F}$)**: Se puede decir que es la capacidad que posee la bobina de generar líneas de fuerza en un circuito magnético. La fuerza magnetomotriz aumenta con la intensidad de la corriente que fluye por la bobina y con el número de espiras de la misma.

$$\mathscr{F} = N \cdot I$$

$\mathscr{F}$ = *Fuerza magnetomotriz en amperio-vuelta* (Av)
N = *Número de espiras*
I = *Intensidad de corriente* (A)

Ejemplos

15.3 Para el funcionamiento de un electroimán se necesita una fuerza magnetomotriz de 500 Av. Indicar dos posibilidades de conseguirlo.

Solución: Si fabricamos una bobina con 500 espiras, el número de amperios que tendremos que hacer pasar por ella será de:

$\mathscr{F} = N \cdot I$ despejando $I = \frac{\mathscr{F}}{N} = \frac{500}{500} = 1 \text{ A}$

¿y si la fabricamos con 100 espiras? $I = \frac{500}{100} = 5 \text{ A}$

Para la fabricación de electroimanes muy potentes, como por ejemplo los que se utilizan para suspender en un colchón magnético un tren de alta velocidad sobre un monorrail, se necesitan fuerzas magnetomotrices muy elevadas. Es decir, bobinas con muchas espiras que son atravesadas por grandes intensidades de corriente. Para evitar fabricar bobinas de grandes dimensiones se utilizan materiales superconductores. De esta forma se consiguen potentísimos campos magnéticos con pocas espiras y corrientes de miles de amperios, que no calientan los superconductores por efecto Joule por carecer éstos de resistencia eléctrica.

- **Intensidad de campo magnético (H)**: Nos indica lo intenso que es el campo magnético. La intensidad de campo en una bobina depende de la fuerza magnetomotriz ($N \cdot I$). Ahora bien, cuanto más larga sea la bobina, más se dispersan las líneas de campo, dando como resultado una intensidad de campo más débil; por lo que se puede decir que, para una fuerza magnetomotriz constante, la intensidad de campo (H) es inversamente proporcional a la longitud media de las líneas de campo, tal como se expresa en la siguiente ecuación:

$$H = \frac{N \cdot I}{L}$$

H = *Intensidad del campo en amperio-vuelta/metro* (Av/m)
N = *Nº de vueltas de la bobina*
I = *Intensidad de la corriente* (A)
R = *Longitud de la bobina* (m)

Ejemplos

15.4 Calcular la intensidad del campo y la inducción magnética en el interior de la bobina de la Figura 15.15. El número de espiras de la misma es de 300, la corriente 10 A.

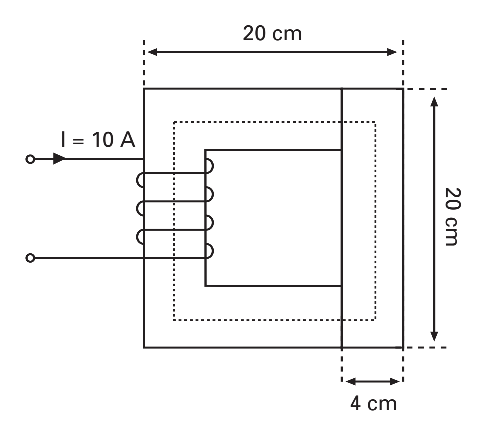


Figura 15.15

Solución: Primero determinamos la línea media por donde se van a establecer las líneas de campo. Para ello observamos las dimensiones del núcleo de la bobina:

$$L = 16 + 16 + 16 + 16 = 64 \text{ cm} = 0{,}64 \text{ m}$$

$$H = \frac{N \cdot I}{L} = \frac{300 \cdot 10}{0{,}64} = 4.687{,}5 \text{ Av/m}$$

Curva de magnetización. Saturación magnética

Cuando se somete a una substancia a la acción de un campo magnético creciente *H*, la inducción magnética que aparece en la misma también aumenta en una relación determinada. Por lo general, esta relación (*B-H*) no es constante, por lo que es de gran utilidad conocer la curva de magnetización, que representa el valor de la inducción en función de la intensidad de campo en cada material.

En la curva de la Figura 15.16 se ha representado la relación que se da entre la inducción *B* conseguida en un núcleo de hierro y la intensidad de campo *H* aplicada por la bobina. En ella se puede apreciar que para valores de intensidad de campo moderados, la inducción magnética crece proporcionalmente. A partir de estos valores, aparece un punto de inflexión en la curva y a los aumentos de la intensidad de campo le corresponden aumentos pequeñísimos de inducción magnética. A partir de ese punto se dice que el hierro ha alcanzado la **saturación magnética**.

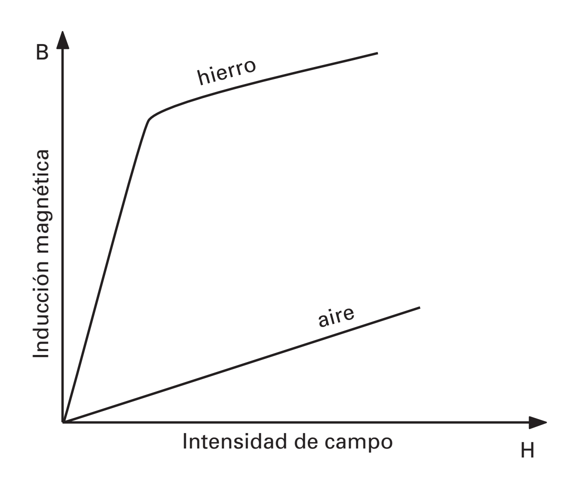


Figura 15.16

Para explicar el fenómeno de la saturación magnética se puede recurrir a la teoría molecular de los imanes: Cuando se introduce en una bobina un núcleo de una substancia ferromagnética y se hace circular una corriente eléctrica por dicha bobina, aparece un campo magnético en su interior, de intensidad *H*, que orienta un cierto grado las moléculas magnéticas de dicha substancia; lo que refuerza el campo con una inducción *B*. Un aumento de la intensidad de la corriente trae como consecuencia un aumento de *H*; lo que hace orientarse un poco más las moléculas magnéticas que se ve reflejado en un nuevo aumento de la inducción. Si seguimos aumentando la intensidad de la corriente, y con ella *H*, llega un momento en que las moléculas magnéticas están ya totalmente orientadas y por mucho que se aumente la intensidad del campo, éste ya no se ve reforzado. Se ha alcanzado la saturación magnética.

En la Figura 15.16 también se ha incluido la curva de magnetización del aire, donde se observa un crecimiento pequeño pero constante de la inducción magnética alcanzada respecto a la intensidad de campo de la bobina.

Se puede comprobar experimentalmente, como al introducir en el núcleo de una bobina una barra de hierro, se aprecia un notable aumento de las propiedades magnéticas de dicha bobina. Por esta razón, siempre que deseemos producir campos magnéticos intensos utilizaremos núcleos de hierro, como es el caso de los electroimanes.

Cuando se introduce en el núcleo de una bobina una substancia ferromagnética, se aprecia un aumento de líneas de fuerza en el campo magnético. Si llamamos B_0 a la inducción magnética que produce el electroimán con un núcleo de aire, y B a la inducción magnética conseguida al introducir una substancia ferromagnética, tendremos que:

$$B = \mu_r \cdot B_0$$

μ_r es el poder que posee la substancia ferrromagnética de multiplicar las líneas de campo. A este parámetro se le conoce por el nombre de permeabilidad. En este caso, se trata de la **permeabilidad relativa** con respecto al aire o al vacío.

Este fenómeno lo podemos explicar valiéndonos de la teoría molecular de los imanes: La bobina con núcleo de aire produce un número determinado de líneas de fuerza. Al introducir un trozo de hierro, éste se ve sometido a la acción de estas líneas de fuerza y sus moléculas magnéticas tienden a orientarse. El núcleo de hierro ahora es un imán temporal que refuerza la acción del campo magnético original.

En la práctica, es más usual utilizar el concepto de **permeabilidad absoluta** (**μ**). Ésta nos relaciona la intensidad de campo que produce la bobina (H) con el nivel de inducción magnética alcanzado al introducir una substancia ferromagnética en el núcleo.

$$\mu = \frac{B}{H}$$

O lo que es lo mismo: $B = \mu \cdot H$, donde se puede apreciar el poder multiplicador de la permeabilidad.

Las unidades de permeabilidad en el S.I. se dan en Henrios/metro (H/m).

Cada substancia magnética tiene su propio coeficiente de permeabilidad. Cuanto mayor es este coeficiente, mejores propiedades magnéticas poseerán estas substancias. Como ya estudiaremos a continuación, la permeabilidad de los materiales no es constante, y depende sobre todo de los niveles de inducción a que se someta a los mismos.

La **permeabilidad del aire o el vacío** en el S.I. es: $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ H/m

Con esta expresión relacionamos la permeabilidad absoluta con la relativa:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$$

Ejemplos

15.5 Determinar la permeabilidad absoluta y relativa que aparecerá en el núcleo de hierro de un electroimán si se ha medido un flujo magnético de 5 mWb. Los datos que se conocen son: N = 500 espiras, I = 15 A, longitud media del núcleo = 30 cm, superficie recta del núcleo = 25 cm^2.

Solución:

Primero calculamos la inducción magnética: $B = \frac{\Phi}{S} = \frac{0{,}005}{0{,}0025} = 2$ T

La intensidad de campo en la bobina es: $H = \frac{N \cdot I}{L} = \frac{500 \cdot 15}{0,3} = 25.000 \text{ Av/m}$

La permeabilidad absoluta es entonces: $\mu = \frac{B}{H} = \frac{2}{25.000} = 0,00008 \text{ H/m}$

La permeabilidad relativa: $\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} = \frac{0,00008}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} = 64$

Este último resultado nos indica que las líneas de campo es 64 veces mayor con el núcleo de hierro que con un núcleo de aire.

Los datos obtenidos en los ensayos de magnetización de diferentes substancias se pueden reflejar también en una tabla como la 15.1.

	Hierro forjado		**Chapa normal**		**Chapa al silicio**	
B (T)	**H (Av/m)**	μ	**H (Av/m)**	μ	**H (Av/m)**	μ
0,1	80	$1,25 \cdot 10^{-3}$	50	$2 \cdot 10^{-3}$	90	$1,11 \cdot 10^{-3}$
0,3	120	$2,5 \cdot 10^{-3}$	65	$4,62 \cdot 10^{-3}$	140	$2,14 \cdot 10^{-3}$
0,5	160	$3,13 \cdot 10^{-3}$	100	$5 \cdot 10^{-3}$	170	$2,94 \cdot 10^{-3}$
0,7	230	$3,04 \cdot 10^{-3}$	180	$3,89 \cdot 10^{-3}$	240	$2,92 \cdot 10^{-3}$
0,9	400	$2,25 \cdot 10^{-3}$	360	$2,5 \cdot 10^{-3}$	350	$2,57 \cdot 10^{-3}$
1,1	650	$1,69 \cdot 10^{-3}$	675	$1,63 \cdot 10^{-3}$	530	$2,08 \cdot 10^{-3}$
1,3	1.000	$1,3 \cdot 10^{-3}$	1.200	$1,08 \cdot 10^{-3}$	1.300	$1 \cdot 10^{-3}$
1,5	2.400	$6,25 \cdot 10^{-4}$	2.200	$6,82 \cdot 10^{-3}$	5.000	$3 \cdot 10^{-4}$
1,6	5.300	$3,02 \cdot 10^{-4}$	3.500	$4,57 \cdot 10^{-4}$	9.000	$1,78 \cdot 10^{-4}$
1,7	7.000	$2,43 \cdot 10^{-4}$	6.000	$2,83 \cdot 10^{-4}$	15.500	$1,1 \cdot 10^{-4}$
1,8	11.000	$1,64 \cdot 10^{-4}$	10.000	$1,8 \cdot 10^{-4}$	27.500	$6,55 \cdot 10^{-5}$
1,9	17.000	$1,11 \cdot 10^{-4}$	16.000	$1,19 \cdot 10^{-4}$		
2	27.000	$7,41 \cdot 10^{-5}$	32.000	$6,25 \cdot 10^{-4}$		

Tabla 15.1

Con la ayuda de los datos de la Tabla 15.1 es posible comprobar como la permeabilidad de un material no es constante y como la permeabilidad se hace más pequeña según nos acercamos a los niveles de saturación magnética.

Histéresis magnética

El estudio de la histéresis tiene una gran importancia en los materiales magnéticos, ya que este fenómeno produce pérdidas en los núcleos de los electroimanes cuando son

sometidos a la acción de campos magnéticos alternos. Estas pérdidas se transforman en calor y reducen el rendimiento de los dispositivos con circuitos magnéticos, como transformadores, motores, generadores, etc.

La palabra histéresis significa remanencia. Después de someter a una substancia ferromagnética a la acción de un campo magnético, cuando éste desaparece, la substancia manifiesta todavía un cierto nivel de inducción magnética, que recibe el nombre de **magnetismo remanente**.

En la Figura 15.17 se muestra el aspecto de la curva de magnetización de una substancia ferromagnética cuando es sometida a intensidades de campo magnético alternos.

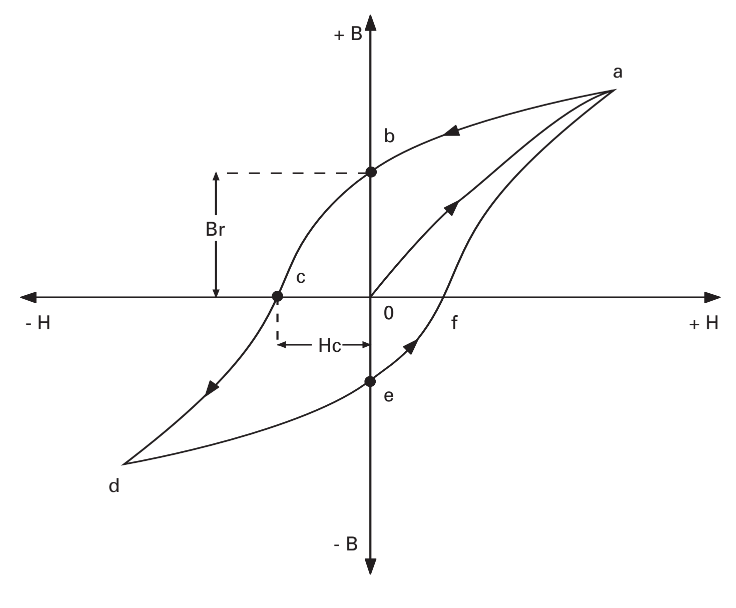


Figura 15.17

En el punto **0** la substancia no ha sido magnetizada nunca y, en consecuencia, la inducción magnética es nula.

En el tramo (**0-a**) se va aumentando la intensidad de campo *H*, con lo que se consiguen valores crecientes de inducción hasta llegar a la saturación.

En el tramo (**a-b**) se va reduciendo la intensidad de campo en la bobina. La inducción también se reduce, pero no en la misma proporción que antes. En el punto (**b**) se ha anulado la intensidad de campo, sin embargo, la substancia manifiesta todavía un cierto magnetismo remanente (B_r).

En el tramo (**b-c**) se invierte el sentido del campo magnético (esto se consigue invirtiendo el sentido de la corriente eléctrica que alimenta la bobina del ensayo). En el

punto (**c**) la inducción es cero; se ha conseguido eliminar por completo el magnetismo remanente. Para ello, ha habido que aplicar una intensidad de campo (H_c), conocida por el nombre de **campo coercitivo**.

En el tramo (**c-d**) se sigue aplicando una intensidad de campo negativo, con lo que se consiguen niveles de inducción negativos hasta alcanzar la saturación.

En los tramos (**d-e**), (**e-f**) y (**f-a**) se completa el ciclo de histéresis. La curva no pasa otra vez por el punto (**0**) debido a la histéresis.

Las pérdidas que se originan en los materiales ferromagnéticos debido a la histéresis son proporcionales al área del ciclo. Si nos fijamos en el ciclo, esta área aumenta en gran manera cuando el campo coercitivo H_c es grande. Por esta razón, cuando se eligen materiales ferromagnéticos para la construcción de aparatos que van a funcionar con corriente alterna, se procura que posean un campo coercitivo lo más pequeño posible.

Sin embargo, para la fabricación de imanes permanentes se eligen materiales que posean un campo coercitivo lo más grande posible.

Las pérdidas por histéresis en materiales sometidos a campos producidos por corrientes alternas aumentan con la frecuencia (cuantos más ciclos de histéresis se den por segundo, más calor se producirá).

También la histéresis se puede explicar mediante la teoría molecular de los imanes: Al someter a un trozo de hierro a un campo alterno, las moléculas magnéticas se ven forzadas a girar en uno y otro sentido, produciéndose una especie de rozamiento molecular que produce calor. Este calor es más grande cuanto más se resisten las moléculas a cambiar de posición.

Cálculo de circuitos magnéticos

Se puede decir que un circuito magnético es por donde se establecen las líneas de campo. Para determinar la fuerza magnetomotriz (los amperios-vuelta) que debe aportar una bobina a un circuito magnético para conseguir un determinado nivel de inducción magnética se utiliza la siguiente expresión:

Como $H = \frac{N \cdot I}{L}$, de aquí se deduce que: $N \cdot I = H \cdot L$,

o lo que es lo mismo $\mathcal{F} = H \cdot L$

Con esta última expresión y con la ayuda de las curvas de magnetización o de tablas como la 15.1 ya podemos resolver algunas cuestiones.

Ejemplos

15.6 En la Figura 15.18 se muestran las dimensiones de un circuito magnético fabricado con chapa al silicio. Se necesita obtener un nivel de inducción magnética de 1,3 T. Calcular la corriente que tendrá que recorrer la bobina si ésta posee 750 espiras.

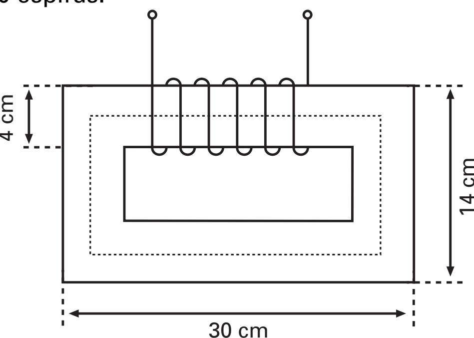


Figura 15.18

Solución: Consultando la Tabla 15.1 tenemos que para conseguir una inducción de 1,3 T en chapa al silicio se necesita una intensidad de campo igual a $H = 1.300$ Av.

Según se desprende de la Figura 15.18 la longitud media de las líneas de campo es:

$$L = 26 + 10 + 26 + 10 = 72 \text{ cm} = 0{,}72 \text{ m}$$

La fuerza magnetomotriz necesaria será entonces:

$$\mathscr{F} = H \cdot L = 1300 \cdot 0{,}72 = 936 \text{ Av}$$

La intensidad de la corriente: $I = \dfrac{\mathscr{F}}{N} = \dfrac{936}{750} = 1{,}25 \text{ A}$

En el caso de que el circuito magnético esté compuesto por diferentes partes, se suman las fuerzas magnetomotrices de cada una de las diferentes partes del circuito magnético.

Ejemplos

15.7 En el circuito magnético de la Figura 15.19 está fabricado con hierro forjado. Se desea obtener en el entrehierro (espacio sin hierro, donde las líneas de campo se tienen que establecer con gran dificultad por el aire) una inducción

magnética de 0,9 T. Suponiendo que todo el flujo se conduce por dicho entrehierro y que no se dispersa, determinar la intensidad de corriente que habrá que proporcionar a la bobina de 500 espiras.

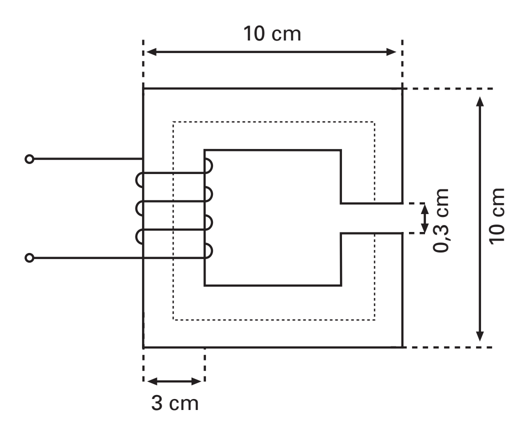


Figura 15.19

Solución: La intensidad de campo necesaria para conseguir una inducción de 0,9 T en la parte del circuito magnético formado por el hierro forjado es según la Tabla 15.1: 400 Av/m.

La longitud media del circuito formado por hierro es:

$$L_{Fe} = 7 + 7 + 7 + 6{,}7 = 27{,}7 \text{ cm} = 0{,}277 \text{ m}$$

La fuerza magnetomotriz que necesita el hierro es:

$$\mathscr{F}_{Fe} = H_{Fe} \cdot L_{Fe} = 400 \cdot 0{,}277 = 111 \text{ Av}$$

La intensidad de campo en al aire o entrehierro la calculamos aplicando el concepto de permeabilidad y recordando que la permeabilidad del aire es $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$.

$$H = \frac{B}{\mu_0} = \frac{0{,}9}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} = 716.197 \text{ Av/m}$$

Teniendo en cuenta que la longitud en el entrehierro es 0,3 cm (0,003 m), la fuerza magnetomotriz que necesita este tramo del circuito magnético es:

$$\mathscr{F}_{aire} = H \cdot L = 716.197 \cdot 0{,}003 = 2.149 \text{ Av}$$

La fuerza magnetomotriz necesaria para todo el circuito magnético será por tanto:

$$\mathscr{F} = \mathscr{F}_{Fe} + \mathscr{F}_{aire} = 111 + 2.149 = 2.260 \text{ Av}$$

La intensidad de la bobina de 500 espiras es: $I = \frac{\mathscr{F}}{N} = \frac{2.260}{500} = 4{,}52 \text{ A}$

Electroimanes

Un electroimán consiste en un núcleo de hierro rodeado de una bobina, que se imanta a voluntad cuando hacemos pasar una corriente eléctrica y se desimanta en el momento que interrumpimos esta corriente (Figura 15.20).

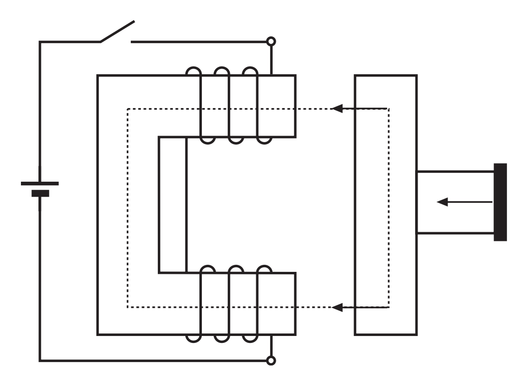


Figura 15.20

La fuerza con la que atrae un electroimán a una pieza de hierro móvil (armadura) a través del aire o entrehierro se puede calcular con la ayuda de la siguiente expresión:

$$F = 40.000 \cdot B^2 \cdot S$$

F = *Fuerza de atracción en* Kp
B = *Inducción en el núcleo en T*
S = *Superficie de contacto entre el núcleo y el hierro móvil en* m^2

Ejemplos

15.8 Determinar la fuerza con la que atraerá el electroimán de la Figura 15.21 a la armadura de hierro si la inducción que aparece en el núcleo es de 1,5 T.

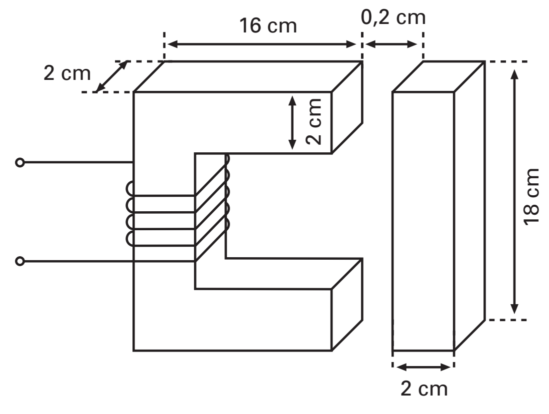


Figura 15.21

Solución: La superficie de atracción de uno de los polos es: $S = 2 \cdot 2 = 4$ cm^2

Como vamos a calcular la fuerza de atracción de los dos polos, la superficie será entonces: $S = 2 \cdot 4 = 8$ cm^2 = 0,0008 m^2

La fuerza de atracción del electroimán es:

$$F = 40.000 \cdot B^2 \cdot S = 40.000 \cdot 1{,}5^2 \cdot 0{,}0008 = 72 \text{ Kp}$$

15.9 Se desea conseguir que el electroimán de la Figura 15.21 desarrolle una fuerza de atracción de 2,88 Kp. Teniendo en cuenta que el núcleo está fabricado con hierro forjado y que la bobina posee 344 espiras, calcular la intensidad de corriente eléctrica para conseguirlo.

Solución: Determinaremos primero la inducción magnética que se tiene que dar en el entrehierro:

$F = 40.000 \cdot B^2 \cdot S$, despejando: $B = \sqrt{\dfrac{F}{40.000 \cdot S}} = \sqrt{\dfrac{2{,}88}{40.000 \cdot 0{,}0008}} = 0{,}3 \text{ T}$

Consultando en la Tabla 15.1, tenemos que para conseguir 0,3 T en chapa normal necesitamos aplicar una intensidad de campo igual a 120 Av/m.

La longitud media del núcleo de chapa es:

$$L = 16 + 16 + 16 + 16 = 64 \text{ cm} = 0{,}64 \text{ m}$$

La fuerza magnetomotriz para chapa es: $\mathscr{F} = H \cdot L = 120 \cdot 0{,}64 = 77$ Av

La intensidad de campo en el aire es: $H = \dfrac{B}{\mu_0} = \dfrac{0{,}3}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} = 238.732$ Av/m

La longitud media del entrehierro es: $L = 0{,}2 + 0{,}2 = 0{,}4$ cm = 0,004 m

La fuerza magnetomotriz para el entrehierro es:

$$\mathscr{F} = H \cdot L = 238.732 \cdot 0{,}004 = 955 \text{ Av}$$

La fuerza magnetomotriz para todo el circuito es: $\mathscr{F} = 77 + 955 = 1.032$ Av

Dado que la bobina es de 344 espiras, la intensidad con la que habrá que alimentarla es:

$$I = \frac{\mathscr{F}}{N} = \frac{1.032}{344} = 3 \text{ A}$$

Aplicaciones prácticas de los electroimanes

Según como se disponga el núcleo de los electroimanes éstos pueden ser de culata (Figura 15.22) o de núcleo móvil (Figura 15.23). En los electroimanes el núcleo suele ser de un material ferromagnético con un bajo campo coercitivo, de tal forma, que sólo

se imanta cuando las bobinas están siendo recorridas por una corriente eléctrica. En los dos tipos de electroimanes la parte móvil es atraída hacia el núcleo mientras alimentamos a la bobina con corriente eléctrica.

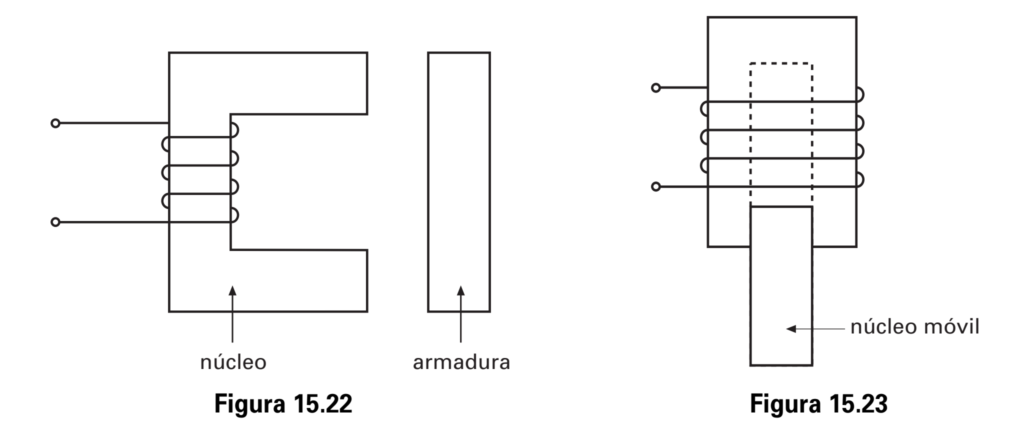


Figura 15.22 **Figura 15.23**

Las aplicaciones de los electroimanes son muy variadas. Seguidamente, exponemos algunas de las más relevantes:

- **Frenos magnéticos**: Se aplican sobre todo en ascensores, montacargas y grúas. Las zapatas de frenado se abren mediante un electroimán cuando existe una situación normal, es decir, cuando hay tensión en la red. Si por causa de una avería desaparece el suministro de energía eléctrica, las zapatas se cierran sobre la superficie de un tambor, con lo que frenan el sistema e impiden la caída al vacío de la carga.
- **Electroválvulas**: La válvula abre o cierra el circuito hidráulico o neumático según sea o no alimentada la bobina del electroimán que lleva incorporado. La aplicación de las electroválvulas está muy extendida en todo tipo de aplicaciones industriales, donde la automatización de los fluidos tiene una gran importancia.

  Por ejemplo, las lavadoras automáticas tienen una electroválvula para abrir el circuito de admisión de agua.
- **Timbres.** Los timbres se utilizan para producir señales acústicas.
- **Sistemas que separan los materiales magnéticos de los magnéticos**: Se utilizan para separar el acero y el hierro del carbón, piedras o minerales, así como para separar los residuos de acero de la arena de moldeo y las virutas y limaduras de los talleres mecánicos.
- **Relés y contactores:** El contactor se podría definir como un interruptor de múltiples contactos que se puede accionar a distancia (Figura 15.24). El funcionamiento de este dispositivo es como sigue (Figura 15.25): Cuando cerramos el interruptor simple, la bobina es atravesada por la corriente eléctrica y genera un

campo magnético que hace que el núcleo atraiga a la armadura, arrastrando consigo a los contactos móviles. El resultado es que estos contactos cambian de posición y se cierran.



Figura 15.24

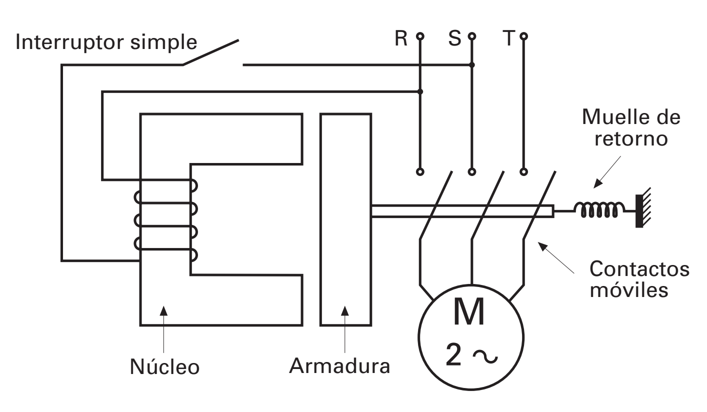


Figura 15.25

La corriente eléctrica que necesita la bobina para crear el campo magnético necesario para que la armadura atraiga hacia sí al núcleo, es muy pequeña en relación a la corriente que va a circular por los contactos principales que alimentan al motor.

Por lo general, los contactores se suelen accionar mediante pulsadores, tal como se muestra en el esquema de la Figura 15.26. En este caso, vamos a estudiar la forma de conseguir que un motor se ponga en marcha con la sola acción de apretar el pulsador I. La parada se hará también apretando el pulsador 0. Al apretar el pulsador de marcha I se acciona la bobina KM1 del contactor, cerrándose sus contactos principales y poniendo en marcha el motor. Para evitar la desconexión de la bobina al dejar de pulsar I, se ha conectado un contacto auxiliar del contactor en paralelo con el pulsador I. Al dejar de pulsar I, éste se abre, pero la bobina sigue siendo atravesada por una corriente, que ahora circula por el propio contacto auxiliar del contactor. El pulsador de paro 0 tiene su contacto normalmente cerrado. Al apretar el botón de dicho pulsador, se abre su contacto y corta la corriente de la bobina, con lo cual el contactor abre sus contactos principales y el auxiliar, y el motor se para.

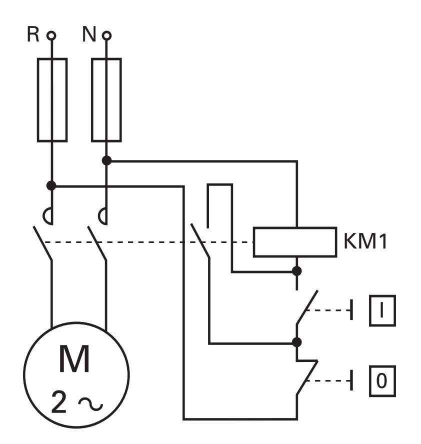


Figura 15.26

Las ventajas del empleo de relés y contactores son realmente amplias. Seguidamente mencionamos algunas de ellas de especial interés:

- Se consigue manejar las grandes intensidades que atraviesan los contactos del circuito principal sólo con alimentar la bobina del electroimán con una pequeña corriente.
- En el caso de tener que manejar grandes intensidades o tensiones, sería complicado y peligroso para el operario hacerlo con un aparato manual, sin embargo, no es ningún problema hacerlo con un contactor.
- Con el contactor se puede conseguir automatizar una maniobra, de tal forma que el operario sólo tenga que apretar un botón para dar marcha al proceso, ya que el resto de las maniobras se realizan automáticamente.

Aparte de las aplicaciones del electromagnetismo ya mencionadas, existen otras muchas más, como son: aparatos de medida analógicos, transformadores, generadores y motores, que estudiaremos con más detenimiento en los tomos 2 y 3 de este “Curso general de electricidad”.

En la actualidad se investiga en la creación de nuevos materiales ferromagnéticos por diferentes procedimientos de laboratorio con el objeto de darles a éstos ciertas características que los hagan útiles para el desarrollo de aplicaciones especiales. Como por ejemplo:

- Conductores eléctricos que poseen una propiedad conocida como “magnetorresistencia”. Es decir, materiales en los que la resistencia eléctrica varía cuando son sometidos a la acción de un campo magnético. Esto puede tener aplicaciones como, por ejemplo, elementos sensibles o detectores de campos magnéticos, detectores de proximidad magnéticos, etc.
- Etiquetado magnético para evitar el robo de artículos en grandes almacenes.

Resúmen de Conceptos

A los materiales que son susceptibles de ser atraídos por un imán se les conoce por el nombre de **materiales ferromagnéticos**.

A las zonas de un imán donde se produce la mayor atracción se les denomina **polos magnéticos**.

Para la construcción de **imanes permanentes** se utilizan aleaciones de: acero-tungsteno, acero-cobalto, acero al titanio, hierro-níquel-aluminio-cobalto y otras más.

Los **imanes temporales** son de gran utilidad para la construcción de núcleos para electroimanes, motores, generadores y transformadores. En estos casos se emplea la chapa de hierro aleada, por lo general, con silicio.

Las **líneas de campo** representan la forma del campo magnético. Salen por el norte y entran por el sur.

Cuando un conductor es atravesado por una corriente eléctrica, a su alrededor aparece un campo magnético proporcional a la intensidad de la corriente eléctrica.

En una **bobina**, el campo magnético de cada espira se suma al de la siguiente, concentrándose éste en el centro de la misma.

A la cantidad de líneas de un campo magnético se le denomina **flujo magnético.** Se representa por la letra griega Φ y su unidad es el weber (Wb) en el sistema internacional.

$$B = \frac{\Phi}{S}$$

La **inducción magnética** se define como la cantidad de líneas de fuerza que atraviesan perpendicularmente la unidad de superficie. Se representa por la letra griega B y su unidad es la tesla (T) en el sistema internacional.

$$\mathscr{F} = N \cdot I$$

La **fuerza magnetomotriz** es la capacidad que posee la bobina de generar líneas de fuerza en un circuito magnético. Se representa por la letra $\mathscr{F}$ y su unidad es el amperio-vuelta (Av).

$$H = \frac{N \cdot I}{L}$$

La **intensidad de campo magnético** nos indica lo intenso que es el campo magnético producido por una bobina. Se representa por la letra H y su unidad es el amperio-vuelta/metro (Av/m).

$$B = \mu_r \cdot B_0$$

La **permeabilidad relativa** nos indica el poder que posee una substancia ferromagnética de multiplicar las líneas de campo. Se representa por la letra μ_r.

$\mu = \dfrac{B}{H}$

La **permeabilidad absoluta** (μ) nos relaciona la intensidad de campo que produce la bobina (H) con el nivel de inducción magnética alcanzado al introducir una sustancia ferromagnética en el núcleo.

$\mu_r = \dfrac{\mu}{\mu_0}$

La **permeabilidad del aire o el vacío** en el S.I. es: $\mu_0 = 4\,\pi \cdot 10^{-7}$ H/m.

$F = 40.000 \cdot B^2 \cdot S$

La **fuerza** con la que atrae un electroimán a una pieza de hierro móvil (armadura) a través del aire o entrehierro se puede calcular con la ayuda de la siguiente expresión:

Actividades

15.1. ¿Qué es lo que puede causar la pérdida de las propiedades magnéticas en un imán permanente?

a. ❑ Corrientes eléctricas elevadas.

b. ❑ Golpes y excesos de la temperatura.

c. ❑ Disminución de la temperatura.

15.2. ¿Cómo se consigue aumentar el nivel de inducción magnética en una bobina con núcleo de aire?

a. ❑ Introduciendo una substancia ferromagnética en el núcleo.

b. ❑ Sólo es posible aumentar la inducción magnética aumentando la intensidad por la bobina.

15.3. ¿Cómo es la permeabilidad de los materiales ferromagnéticos?

a. ❑ Es un valor constante.

b. ❑ Depende de la inducción magnética alcanzada por los materiales.

15.4. Para la construcción de núcleos de electroimanes, transformadores y motores empleamos preferentemente el,

a. ❑ Acero.

b. ❑ Hierro.

15.5. Si un material ferromagnético posee una permeabilidad relativa de 100, calcular su permeabilidad absoluta.

Resultado: $\mu = 1{,}25 \cdot 10^{-4}$ H/m

15.6. Un circuito magnético con núcleo de hierro forjado posee una longitud de 10 cm y una sección transversal de 3 cm². La bobina tiene 100 espiras y es alimentada por una corriente de 1 A. Con la ayuda de la Tabla 15.1, averiguar: H, B, Φ, μ_r y $\mathscr{F}$.

Resultado: H = 1000 Av/m; B = 1,3 T; Φ = 390 µWb, μ_r = 1.034,5; $\mathscr{F}$ = 100 Av

15.7. Un núcleo de acero con una inducción de 1,2 T posee una permeabilidad de $4 \cdot 10^{-3}$ H/m. La longitud de la bobina es de 25 cm y la superficie recta del núcleo es de 5 cm². Calcular el flujo magnético, la intensidad de campo y la fuerza magnetomotriz.

Resultado: Φ = 0,6 mWb; H = 300 Av; $\mathscr{F}$ = 75 Av

15.8. El núcleo rectangular de la Figura 15.27 es de chapa al silicio con una sección transversal de 25 cm². La bobina posee 500 espiras y es atravesada por una corriente de 10 A. Con la ayuda de los datos presentados en su correspondiente curva de magnetización (Tabla 15.1), determinar: B, Φ y $\mathscr{F}$.

Resultado: B = 1,5 T; Φ = 3,75 mWb; $\mathscr{F}$ = 5000 Av

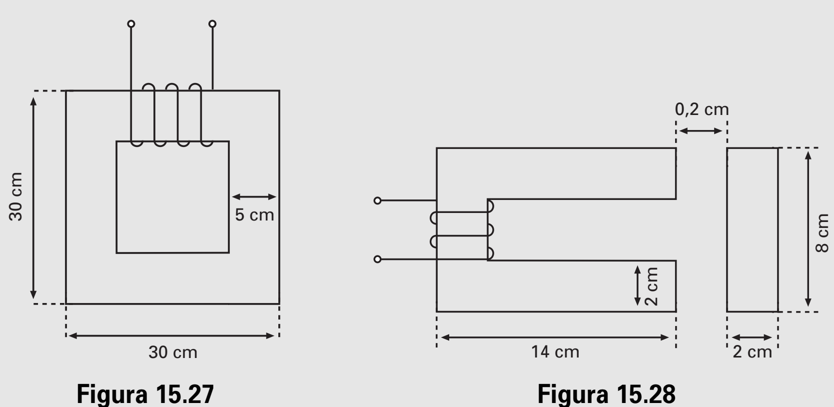


Figura 15.27 **Figura 15.28**

15.9. ¿Cuántos amperios habrá que hacer pasar por la bobina del ejercicio 15.8 para que exista un flujo magnético de 4 mWb?

Resultado: 18 A

15.10. El circuito magnético de la Figura 15.28 está fabricado con chapa magnética normal. Se desea obtener en el entrehierro una inducción magnética de 1,1 T. Suponiendo que todo el flujo se conduce por dicho

entrehierro y que no se dispersa, determinar el número de espiras con la que habrá que fabricar la bobina si la quiere suministrar una corriente de 2 A.

Resultado: 1.872 espiras

15.11. Determinar la fuerza con la que atraerá un electroimán a la armadura de hierro si la inducción que aparece en el núcleo es de 1,3 T y la superficie total de contacto entre el núcleo y el hierro móvil es de 4 cm^2.

Resultado: 27 Kp

15.12. Se desea conseguir que el electroimán de un contactor desarrolle una fuerza de atracción al bloque de contactos móviles de 2 Kp. Teniendo en cuenta que el núcleo está fabricado con hierro forjado, que la bobina posee 1.000 espiras y que las dimensiones y forma del circuito magnético de dicho electroimán son las que se muestran en la Figura 15.29, calcular la intensidad de corriente eléctrica para conseguirlo.

Resultado: 2,4 A

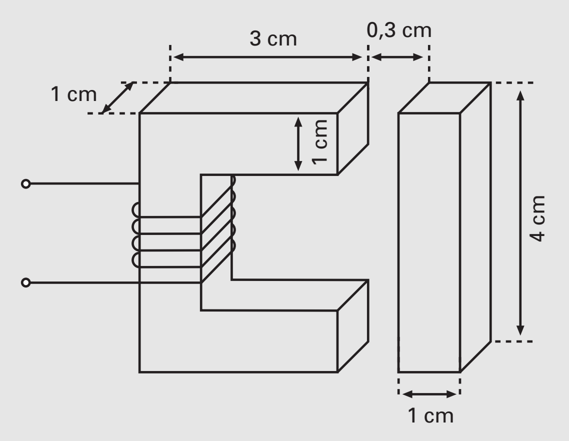


Figura 15.29

15.13. Consigue diferentes dispositivos que funcionen gracias al electromagnetismo, como por ejemplo: un contactor, una electroválvula, un timbre, un interruptor automático, etc. Analiza las partes que los constituyen e intenta comprobar y explicar su funcionamiento.

15.14. Consigue un contactor, unos pulsadores de marcha-paro, unos fusibles y con la ayuda del esquema eléctrico de la Figura 15.26 realiza el arranque de un motor.

Soluciones

1. LA ELECTRICIDAD CONCEPTOS GENERALES

1.1.........a   1.2.........c   1.3.........a   1.4.........c   1.5.........b

2. RESISTENCIA ELÉCTRICA

2.1.........a   2.2.........b

3. RESISTENCIA ELÉCTRICA DE LOS MATERIALES

3.1.........b   3.2.........a   3.3.........b   3.4.........c   3.5.........c

4. POTENCIA Y ENERGÍA ELÉCTRICA

4.10.......a   4.11.......c

5. CIRCUITOS SERIE Y PARALELO

5.10........a y b   5.11........a y c

7. CONEXIÓN DE GENERADORES

7.4.........a   7.5.........b   7.6.........c

8. CÁLCULO DE LA SECCIÓN DE CONDUCTORES

8.1.........c

9. EFECTO TÉRMICO DE LA ELECTRICIDAD

9.1.........b   9.2.........c

10. APLICACIONES DEL EFECTO TÉRMICO

10.1.......a   10.2.......c   10.3.......a

11. LOS CONDENSADORES

11.1.......c 11.2.......a 11.3.......c 11.4.......b 11.5.......c 11.9.......b

11.10....a 11.11....b

12. EL EFECTO QUÍMICO DE LA CORRIENTE ELÉCTRICA

12.1.......b 12.2........a, b y c 12.3.......a y c 12.4. .....b

13. PILAS ELÉCTRICAS

13.1.......a 13.2.......b 13.3.......a 13.4.......c 13.5.......b 13.6.......b

14. ACUMULADORES

14.1.......c 14.2.......b 14.3.......c 14.4.......a 14.5.......b 14.6.......a

14.7.......b

15. MAGNETISMO Y ELECTROMAGNETISMO

15.1.......b 15.2.......a 15.3.......b 15.4.......b